Technisch-physikalische Untersuchungen

von

Aluminium-Elektrolyt-Zellen.

Von

MAX JAKOB.

Von der K. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

Eingereicht im August 1904.

Referent: Professor Dr. KURT HEINKE.
Korreferent: Professor JOHANN OSSANNA.

Mit 32 Abbildungen und 31 in den Text gedruckten Tafeln.

STUTTGART.
DRUCK DER UNION DEUTSCHE VERLAGSGESELLSCHAFT.
1906.

Technisch-physikalische Untersuchungen

von

Aluminium-Elektrolyt-Zellen.

Von

MAX JAKOB.

Von der K. Technischen Hochschule zu München

zur

Erlangung der Würde eines Doktors der technischen Wissenschaften (Doktor-Ingenieurs)

genehmigte

Dissertation.

Eingereicht im August 1904.

Referent: Professor Dr. KURT HEINKE.
Korreferent: Professor JOHANN OSSANNA.

Mit 32 Abbildungen und 31 in den Text gedruckten Tafeln.

STUTTGART.
DRUCK DER UNION DEUTSCHE VERLAGSGESELLSCHAFT.
1906.

Inhaltsverzeichnis.

Seite

A. Geschichtliche Einleitung 1
I. Der Standpunkt der Chemiker 1
II. Der Standpunkt der Techniker und Physiker 3
a) Graetz und Pollak 3
b) Neuere technisch-physikalische Untersuchungen 4
c) Vorbemerkungen zu der vorliegenden Arbeit 6
B. Ausarbeitung der Versuchsergebnisse 8
I. Gleichstromversuche mit einer Zelle 8
a) Qualitative Versuche zum Nachweis des Wellenstrom-, speziell des Wehneltcharakters der Erscheinungen 8
b) Quantitative Versuche zum Studium des Gleichstromformierungsvorgangs 11
II. Wechselstromversuche 25
a) Vorbemerkung und Einteilung 25
b) Versuchsmethoden und -anordnungen 25
A. Aufnahme von Momentanwerten mit Kontaktmacherschaltung 25
1. Versuche mit einer Zelle 27
1a. Versuche an zwei hintereinandergeschalteten Zellen . . . 29
2. Versuche mit der Vierzellenschaltung 29
B. Aufnahme von Mittel- und Effektivwerten mit „Wellenstromschaltung“ 30
1. Wellenstromschaltung für eine Zelle 30
2. Vierzellen-Wellenstromschaltung (zugleich für zwei Zellen) . 31
C. Kombination von Kontaktmacher- u. Wellenstromschaltung . 31
D. Sonstige Versuchsanordnungen 32
c) Versuchsresultate.
Vorbemerkung über die Variation der Versuchsbedingungen . . 33
1. Versuche mit einer Zelle 34
α) Gleichrichterzelle 34
A. Kontaktmacherversuche 34
a) Form der Kurven einer idealen Zelle 34
b) In Wirklichkeit zu erwartende Form der Kurven . 35
c) Tabelle der vorliegenden Kurven und augenfällige Schlüsse aus der Kurvenform 36
b) Kurvenanalyse 53

Seite

B. Versuche nach der „Wellenstrommethode“ 71
a) Bestimmung der Werte durch Planimetrierung der Kurven 71
b) Bestimmung der Werte aus Amperemeter-, Voltmeter- und Wattmeterablesungen 74
c) Einführung von Definitionen für den „Wirkungsgrad der Umformung“ (Umsetzungsgrad) 76
d) Der Umsetzungsgrad einer idealen Zelle 77
e) Schwingende Wechselstromformierung 83
f) Versuchsresultate und Besprechung derselben . . 85
β) Versuche mit einer Aluminiumzelle als Kondensator . . 99
A. Beschreibung der mit dem Kontaktmacher aufgenommenen Kurven 99
B. Die Wellenstromgrößen einiger Versuche (durch Planimetrierung gewonnen) 103
2. Versuche mit vier Zellen 104
A. Kurvenaufnahmen 104
a) Allgemeine Betrachtung der Kurven 104
b) Spezielle Betrachtung der Kurven 110
B. Wellenstromuntersuchungen 111
a) Behandlung der Versuchsresultate 111
b) Vergleich der Umsetzungsgradswerte mit denen einer Umformerbatterie von vier idealen Zellen 112
C. Schlußbemerkung 113
D. Anhang: Zahlentabellen 114

A. Geschichtliche Einleitung.

I. Der Standpunkt der Chemiker.

Das Phänomen der unipolaren Leitung von Aluminiumelektroden in den verschiedensten Elektrolyten ist chemisch bereits recht gründlich untersucht. Seitdem Buff[1]), Wöhler[2]) und Beetz[3]) die ersten Beobachtungen der Erscheinung veröffentlicht haben, ist man sich über den chemischen Vorgang ziemlich klar geworden. Es sei gestattet, die jetzt herrschende Anschauung hier kurz niederzulegen: An der Aluminiumanode eines Voltameters mit oxydierendem Elektrolyten und indifferenter Kathode bildet sich durch Sauerstoffpolarisation ein feiner, kristallinischer, mattgrauer (innen wohl auch olivengrüner) Ueberzug von Aluminiumoxyd Al_2O_3 von sehr großem spezifischen Widerstand, ja von der Wirkung eines Dielektrikums[4]). Der Einfluß des Elektrolyten ist ebenfalls schon ausprobiert. Verdünnte anorganische Säuren wirken nur bis ca. 20 Volt Spannung, alkalische Lösungen dagegen bis zu hohen Spannungen. Besonders gute Erfahrungen hat Mitkewitsch mit fast gesättigten Lösungen von doppeltkohlensaurem Natron gemacht; ich schicke voraus, daß auch ich mit 6 bis 8%iger $NaHCO_3$-Lösung

[1]) Liebigs Ann. C. II, 1857, S. 269.

[2]) Liebigs Ann. C. III, 1858, S. 218.

[3]) Pogg. Ann. Bd. 127, 1866, S. 45. — Wied. Ann. Bd. 127, 1866, S. 56. — Wied. Ann. Bd. 156, S. 464.

[4]) Beetz, Wied. Ann. 1877, Bd. 2, S. 94. — Overbeck, Wied. Ann. 1883, Bd. 19, S. 625. — Streintz, Wied. Ann. 1882, Bd. 17, S. 841. — Derselbe, Wied. Ann. 1887, Bd. 32, S. 116. — Derselbe, Wied. Ann. 1888, Bd. 34, S. 751. — Scott, Wied. Ann. 1899, Bd. 2, S. 406. — K. Norden, Zeitschr. f. Elektrochemie **6**, 1899/1900, Nr. 10 u. 11, S. 159 u. 188. (Analyse des Ueberzugs ergibt ca. 70% Al_2O_3.) — A. Isenburg, Zeitschr. f. Elektrochem. **9**, 1903, Nr. 15.

am besten konstante Verhältnisse und günstigsten Wirkungsgrad bei geringem Aluminiumverschleiß erreicht habe. Die Patentschrift Nr. 130725, Klasse 21g, der A. E.-G. in Berlin behauptet zwar mit Recht, daß bei Wechselstrombeschickung der Zelle Aluminium als Kathode durch H und NaOH zerstört werde, doch ist die Isolierschicht wenigstens bei $NaHCO_3$-Lösung viel gleichmäßiger und beständiger, als sie annimmt. Das Patent der A. E.-G. lautet auf „ein Erdmetall in Verbindung mit organischer Säure (mit Ueberschuß freier Säure zur Vermeidung von Schlammbildung), z. B. das besonders wirksame Magnesiumcitrat oder Aluminiumcitrat.“ Dabei soll Aluminium als Kathode durch H und Oxyd des Erdmetalls (Mg-Oxyd oder Al-Oxyd) nicht geschädigt werden, besonders hohe Spannung ausgehalten und beständige Isolierschicht erzielt werden. Ich stelle diesen Behauptungen gleich hier die folgenden Erfahrungen gegenüber, die ich mit einer gesättigten und einer halbgesättigten Lösung von Mg.-citr. [1]) mit überschüssiger Zitronensäure gemacht habe:

1. Die Formierung geht langsamer vor sich,
2. die aufgehaltene Spannung ist kleiner,
3. der innere Widerstand ist größer,
4. der Oxydüberzug ist ungleichmäßiger, gröber und unbeständiger,
5. die Zerstörung des Aluminiums geschieht nicht langsamer,
6. die Kosten sind höher als bei $NaHCO_3$-Lösung.

Möglicherweise werden mit anders hergestellten Mg- oder Al.-citr.-Lösungen bessere Resultate erzielt. In der vorliegenden Arbeit wurde fast ausschließlich mit $NaHCO_3$-Lösung gearbeitet; immerhin werden einige mit verdünnter SO_4H_2- und Mg.-citr.-Lösung angestellte Versuche mitgeteilt [2]).

Ueber die Wirkung der Aluminiumverunreinigungen liegen keine Versuche vor; ich konnte beim Eisennachweis mit $Fe(CN)_6K_4$ ganz große Verschiedenheiten im Eisengehalt von verschiedenen Aluminiumstücken derselben Lieferung schon durch grobe kolorimetrische Unter-

---

[1]) Al.-citr. konnte ich nicht erhalten; das Mg. citr. pur. von Dr. Bender und Dr. Hobein, München, löste sich kalt fast nicht; dagegen lösten sich 3 Gewichtsteile in 100 Gewichtsteilen kochenden Wassers, ohne sich kalt wieder niederzuschlagen (gesättigte Lösung).

[2]) Aus der neueren chemischen Literatur: D.R.P. Nr. 107435 (1898). Verwendung von Alkaliphosphat und Alkalisalzen der Fettsäuren und ähnlicher Säuren. — D.R.P. Nr. 110740 (1899) von C. Liebenow. Ammoniumbikarbonat soll hohe Temperatur ertragen. — D.R.P. Nr. 127302 und 127525 (1901). Saure Lösungen von organischen Ammonsalzen, bezw. mandelsauren Salzen der Erden und Erdalkalien. — Pollak und Graetz, Jahrb. f. Elektrochem. IV, 211.

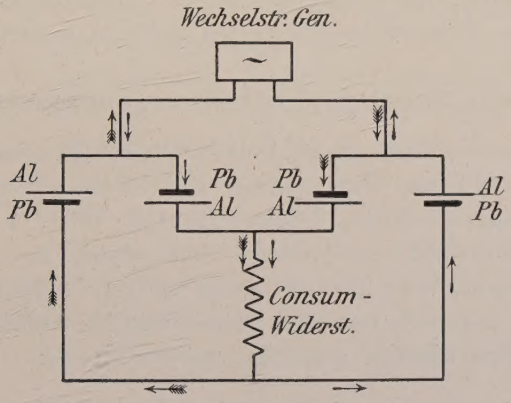
suchung und durch Vergleichung der Abscheidungsdauer, der Menge und Konsistenz des Niederschlags erkennen. Einen ganz hellen rostbraunen Ueberzug, der bei einigen Aluminiumelektroden sich bildete, zugleich mit einer Verschlechterung des Wirkungsgrades, halte ich für Eisenoxyd. Im allgemeinen wurde möglichst eisenfreies Aluminium verwendet.

II. Der Standpunkt der Techniker und Physiker.

a) Graetz und Pollak.

Die physikalischen und technischen Untersuchungen nahmen ihren Ausgang von der gleichzeitigen und voneinander unabhängigen Veröffentlichung eines elektrolytischen Gleichrichters, das heißt einer Vorrichtung, die mittels Aluminiumzellen [1]) Wechselstrom in Gleichstrom umwandelt, durch Graetz und Pollak [2]). Beide gaben gleichzeitig auch die folgende klassische Schaltung an, durch die der Gesamtstrom

Fig. 1.



(beide Stromimpulse) einer Wechselstrommaschine in Gleichstrom verwandelt werden kann [3]). Beide Autoren machen auf die kapazitive Wirkung der Zelle aufmerksam, die wegen der Feinheit der Oxydschicht (des Dielektrikums) sehr groß sei; Graetz betont die Geschwindigkeit

[1]) Auch Ventilzellen, Drosselzellen schon in den Originalarbeiten genannt.

[2]) Graetz, E.T.Z. 1897, S. 423; Wied. Ann. 1897, Bd. 62, S. 323; Zeitschr. f. Elektrochem. 1897, S. 67; Sitzungsberichte der bayr. Ak. d. W. 1897. — Pollak, E.T.Z. 1897. Hinweis auf das Patent der Akkum.-Fabr. Pollak von 1895. Compt. rend. 1897, Bd. 124, S. 1443.

[3]) Zum Verständnis der Fig. 1 bemerke ich, daß der Strom nur in der Richtung Pb—Al eine Zelle passieren kann.

der Bildung und Rückbildung der Schicht, gemäß deren es unmöglich sei, mit der Kohlrauschschen Telephonmethode den Widerstand zu messen. Graetz glaubte bis 22 Volt bei Alaunlösung den Strom vollkommen aufhalten und durch Hintereinanderschaltung von n Zellen $22 \times n$ Volt bewältigen zu können. Pollak veröffentlicht in l'Eclair. électr. 8, 117 (1901) gemeinsam mit Blondin, daß durch Elektrolyse in Kaliumphosphatlösung bis $t < 40^{\circ}$ C der Strom bis 200 Volt gedrosselt worden sei, und daß z. B. bei 42 Wechs. pr. sec., 110 Volt und 1 Amp. pr. qdm. Akkumulatoren mit einem Wirkungsgrad von 75 bis 80 % geladen worden seien [1]). Graetz gibt an, daß ein Wirkungsgrad von 95 % erzielbar sei [2]). Aus den im folgenden angestellten Betrachtungen über den „Umsetzungsgrad" in Zellen wird hervorgehen, daß der von Pollak angegebene Wert der im idealen Fall erreichbare Maximalwert des „Totalumsetzungsgrades", der von Graetz erhoffte größer als der Maximalwert des „Stromumsetzungsgrades" (für Belastung mit Ohmschem Widerstand) ist; beide Werte dürften also zu groß sein, ersterer besonders, weil bei Ladung von Batterien, wie wir sehen werden, ein noch schlechterer „Totalumsetzungsgrad" als bei Ohmschem Widerstand günstigsten Falls zu erwarten ist.

b) Neuere technisch-physikalische Untersuchungen.

Von den technisch-physikalischen Untersuchungen anderer Autoren erwähne ich nur die Arbeiten von Lecher [3]) und Wilson [4]) 1898, Mayrhofer [5]) 1900, Mitkewitsch [6]) 1901, König [7]) 1902, Grisson [8]) 1903 und als kritische Behandlung des Gleichrichters Heinke [9]), Handbuch der Elektrotechnik 1903, I, 2. In diesen Arbeiten ist über viele Eigenschaften der Aluminiumzelle Aufschluß gegeben, von denen einige wichtige angeführt werden mögen:

---

[1]) Siehe auch Compt. rend. **124**, 1443; **132**, 1405; **133**, 94. — Öf. Svensk. Wetensch. Ak. Förh. **58** (139 bis 161).

[2]) Folgendermaßen berechnet: O-Polarisation 20mal so groß als die H-Polarisation, also 95 % Wirkungsgrad (?).

[3]) Sitzungsber. der kais. österr. Ak. d. W. (math.-naturwiss. Klasse, Bd. 107, Abt. IIa, Jahrg. 1898, S. 739.

[4]) E.T.Z. 1898. Auszug aus einem Vortrag vor der Royal Society.

[5]) E.T.Z. 1900, Heft 44, S. 913.

[6]) Electrischestwo 1901 (17 bis 23 und 33 bis 36). — Phys. Zeitschr., 2. Jahrg., 1900/01, S. 746.

[7]) Z. d. V. d. I. 1902, S. 474.

[8]) E.T.Z. 1903, Heft 23, S. 432.

[9]) S. 369, § 262.

Lecher erkannte, daß der Strom niemals völlig aufgehalten wird, daß er aber sehr schnell auf einen ganz kleinen Wert herabsinkt, ferner daß bei größerer Stromdichte der Widerstand größer, aber durch die zugleich auftretende Temperaturerhöhung der Anodenüberzug durchlässiger für Strom wird, also ein Konflikt auftritt, infolgedessen bei niederer Spannung die drahtförmige Anode, bei hoher Spannung die plattenförmige überlegen ist. Leider erstrecken sich die Versuche nur auf Gleichstrom, so daß der Einfluß der Temperatur im Wechselstrombetrieb, wo er wegen der großen Ströme von Kathode zu Anode ungleich bedeutender ist, nicht recht aufgeklärt erscheint.

Wilson beobachtet ebenfalls schon bei 25 ° C bedeutend schlechtere Wirkung der Oxydschicht. Wichtig ist ferner seine Bemerkung

1. daß eine gewisse Zeit (a. a. O. mehr als $^1/_{16}$ sec.[1]) zur Formierung nötig ist,

2. daß durch Erhöhung der Stromdichte die zur Formierung nötige Zeit sich verringert.

Wilson teilt auch einige mit einer Kontaktmachervorrichtung gewonnenen Wechselstromkurven mit, aus denen man wenigstens die Kurvenform ganz gut erkennen kann.

Mayrhofer hat hauptsächlich Kurven aufgenommen und zwar mit der Braunschen Röhre. Die Brauchbarkeit dieser Kurven wird besonders dadurch beeinträchtigt, daß der Beobachter beim Aufzeichnen der Abszissenachse einzig auf sein Augenmaß angewiesen ist. Interessant ist die Beobachtung, wonach sich bei Hintereinanderschaltung mehrerer Zellen der Strom, der vom Al zum Pb fließt, nicht[2]) proportional der Zellenzahl verringert. Mayrhofer schließt daraus, daß der Wechselstrom nach Passieren der Zelle in seiner elektrolytischen Wirkung anders wie zuvor sei, was einer Art Polarisierung der Ionen gleichkäme.

Die bedeutendste unter den neueren Arbeiten scheint mir die von Mitkewitsch zu sein. Er erwähnt zuerst die Aehnlichkeit der Erscheinung mit der Wehneltunterbrecherwirkung und führt qualitative Versuche durch, die das illustrieren (z. B. Untersuchung der elektrolytischen Leuchterscheinung). Er bestätigt, daß der Wirkungsgrad mit der Stromdichte zunimmt (Annäherung an den Wehneltеffekt). Besonderen Wert lege ich darauf, daß er im Gegensatz zu den meisten anderen Autoren niemals einen höheren Wirkungsgrad

---

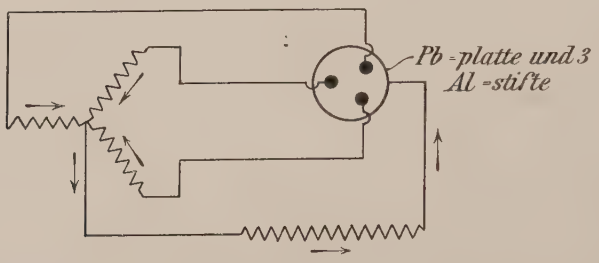
[1]) Dürfte viel zu groß sein!

[2]) Entgegen der Meinung von Graetz (siehe S. 4).

als 50 % erreicht haben will[1]). Er führt verschiedene geistreiche Schaltungen zur Ersparung von Zellen an. Hier sei nur das Schaltungsschema mitgeteilt, nach dem er Drehstrom in Gleichstrom umformt.

König hat besonders Formierungsversuche mit Gleichstrom und Wechselstromversuche mit großen Platten angestellt; seine Wellenstromuntersuchungen vernachlässigen leider die zuerst von Heinke

Fig. 2.



aufgestellten Regeln und sind daher nicht recht wertvoll. Wichtig ist seine Mitteilung, daß die Kapazität von Aluminiumkondensatoren nicht groß sei[2]).

Grisson-Walter glauben den Gleichrichter dadurch wesentlich verbessert zu haben, daß sie die Aluminiumplatte über die Bleiplatte horizontal legen; die aufsteigenden Gasblasen sollen die angefressenen oder durchschlagenen Stellen der Oxydhaut schützen.

Heinke schließlich hat im Handbuch der Elektrotechnik das Material zusammengestellt und besonders seine Ansicht niedergelegt, daß die Formierung darin bestehe, daß eine nicht ganz dichte Haut Al_2O_3 sich bilde und daß die vorhandenen Poren wie eine große Zahl elektrischer Ventile wirkten.

c) Vorbemerkungen zu der vorliegenden Arbeit.

Beim Studium der einschlägigen Literatur findet man große Meinungsverschiedenheiten, Irrtümer und Lücken: So fehlt der exakte Nachweis, daß die Aluminiumzelle im Gleichstrombetrieb sich wie ein Wehneltunterbrecher verhält, so fehlen die den Wehneltunterbrecherversuchen analogen Versuche. Die bisher aufgenommenen Wechselstromkurven sind ungenau und wenig mannigfaltig, sie sind

---

[1]) Allerdings ist auch hier (wie bei allen Autoren) eine exakte Wirkungsgradsdefinition zu vermissen.

[2]) Von mir kontrolliert (s. u.!).

vor allem noch keiner rechnerischen Behandlung unterworfen worden, die einen Einblick gewähren könnte in das Wesen des Umformervorganges, was Variabilität von Widerstand, Kapazität etc. in einer Periode betrifft. Ueberhaupt noch nicht aufgenommen wurden meines Wissens Kurven des Aluminiumzellenkondensators. Schließlich vermißt man eine genaue Untersuchung nach den Regeln der Wellenstrommessung, aus der man effektiven Widerstand, Kapazität etc. berechnen könnte, und das Studium des Einflusses von Elektrodenform, -größe[1]) und -abstand, Temperatur und Kühlung, Spannung und Belastung, Hintereinanderschaltung von Zellen und endlich eine energetische Behandlung auf Grund von exakten Wirkungsgradsdefinitionen.

Die meisten dieser Fragen sind in der vorliegenden Arbeit gestreift oder gründlicher erörtert und zwar in folgender Systematisierung:

I. Gleichstromversuche mit 1 Zelle (Vorversuche):
   a) Qualitative Versuche zum Nachweis des Wellenstrom-, speziell des Wehneltcharakters der Erscheinung,
   b) Quantitative Versuche zum Studium des Gleichstromformierungsvorgangs.

II. Wechselstromversuche (Hauptversuche):
   1. mit 1 Zelle (und 2 Zellen):
      α) als Gleichrichter:
         A. Form der Kurven, Analyse der Kurven, Erklärung des Gleichrichtungsvorgangs,
         B. Untersuchung nach der Wellenstrommeßmethode.
      β) als Kondensator:
         A. Kurvenaufnahmen und Erklärung der Kurven,
         B. Wellenstromuntersuchung.
   2. mit 4 Zellen:
         A. Aufnahme und Besprechung der Kurven,
         B. Wellenstromuntersuchung.

Schließlich sei hier noch erwähnt, daß die vorliegende Abhandlung Versuche zur Grundlage hat, die vom Verfasser in der Zeit vom November 1902 bis November 1903 im elektrotechnischen Institut der K. technischen Hochschule München ausgeführt wurden. Es sei mir an dieser Stelle gestattet, meinen verbindlichsten Dank auszusprechen Herrn Professor Dr. Heinke für die Anregung zu der Arbeit und das ihrem Fortgang stets entgegengebrachte tätige Interesse und Herrn

[1]) Mitkewitsch und Mayrhofer nehmen möglichst kleine Flächen, König, Pollak und Grisson große Flächen.

Professor Ossanna für wertvolle Ratschläge besonders bei der Ausführung der Kurvenanalyse. Zu herzlichem Dank haben mich endlich die Herren Diplom-Ingenieure Erwin Schwarz und Gottfried Huldschiner verpflichtet durch ihren Beistand bei Aufnahme der Kurven.

B. Ausarbeitung der Versuchsergebnisse.

I. Gleichstromversuche mit einer Zelle.

a) Qualitative Versuche zum Nachweis des Wellenstrom-, speziell des Wehneltcharakters der Erscheinungen.

Es lag dem Zweck dieser Arbeit fern, das Verhalten von Aluminium-Elektrolytzellen im Gleichstrombetrieb mit besonderer Ausführlichkeit zu behandeln und zwar aus folgenden Gründen: Während die Untersuchung des Wehneltunterbrechers sich fast ausschließlich auf den Bereich hoher Unterbrechungszahlen erstreckt, muß bei der Drosselzelle im Betrieb gerade vermieden werden, in diesen Bereich zu geraten, so daß sie sich im idealen Fall etwa als Unterbrecher mit der Unterbrecherzahl 0 auffassen ließe; auch im Wechselstrombetrieb arbeitet man möglichst ohne Wehneltentladungen. Es bietet also fast nur rein-physikalisches Interesse, die Analogie mit dem Wehneltunterbrecher durchzuführen. Ferner steht von vornherein fest, daß man mit Gleichstrom nicht so ausgesprochene Wellenstromverhältnisse erhalten wird, wie beim Wehneltunterbrecher, weil bei der Drosselzelle die Unterbrecherwirkung eigentlich schon außerhalb der stationären Betriebsverhältnisse liegt. Auch die im normalen Betrieb durch eine Zelle fließenden Schwachströme haben sicherlich Wellenstromcharakter; diese wurden überhaupt nicht in den Bereich der Untersuchungen gezogen.

Für den Nachweis des Wellenstromcharakters der Erscheinungen stellte es sich als notwendig heraus, mit verdünnter Schwefelsäure zu arbeiten, einmal um in möglichster Analogie mit dem Wehneltunterbrecher zu bleiben, dann aber vor allem deswegen, weil sich hiebei der Wellenstromcharakter noch einigermaßen deutlich ausspricht, während schon bei Anwendung von Alaunlösung, noch mehr bei der von Magnesiumcitrat- oder $NaHCO_3$-Lösung der Uebergang von ganz

kleinen Strömen (Voltameterstadium s. u.) zu sehr hohen Strömen (Stadium des Abschnappens s. u.) fast unmittelbar erfolgt, so daß weder qualitativ noch quantitativ Wellenstrom konstatiert werden kann.

Zunächst wurden nun die qualitativen Hauptversuche angestellt, die man beim Wehneltunterbrecher kennt, und zwar an der Hand der Schilderung dieser Versuche durch Heinke[1]). Dabei waren die Zelle (mit Aluminium als Anode) und ein Regulierwiderstand hintereinander an eine Batterie angeschaltet:

1. Bei niederer Spannung (bei Schwefelsäurelösung etwa bis 5 Volt) hat man auch hier „reine Voltameterwirkung".

2. Bei höherer Spannung (von etwa 10 Volt an) treten „vereinzelte disruptive Entladungen unter violetter Lichterscheinung", zischendem Geräusch und stärkerer Gasentwicklung auf. Bei weiterer Erhöhung der Spannung „nimmt beim Wehneltunterbrecher die Stromstärke eher ab als zu"; hier nimmt sie ganz besonders stark ab. Die Unterbrechungen vermehren sich bis vielleicht höchstens 10 pr. sec.; dabei geht das knipsende Unterbrechergeräusch allmählich in ein Geknatter wie von ganz fernem Kleingewehrfeuer über. Bis ca. 300 Unterbrechungen pr. min. konnte durch synchrones Aufzeichnen von Punkten mit dem Bleistift die Unterbrechungszahl gut gezählt werden. Niemals gelang es mir, einen Unterbrecherton zu erhalten; höchstens wurde das Knattern so lebhaft, daß es vom Ohr gerade noch als solches erfaßt werden konnte.

3. Bei wenig höherer Spannung ging dann plötzlich der Strom unter lebhaftem Kochen und Zischen rapid in die Höhe: Abschnappen[2]).

4. Auch das Glühstadium[2]) konnte nach Einschaltung entsprechend starker Bleisicherungen in den Stromkreis ziemlich lang erhalten werden. —

Des weiteren wurde auch die schöne Erscheinung des elektrolytischen Leuchtens häufig und genau beobachtet: (und zwar mit den verschiedensten Elektrolyten.) Im nicht zu hellen Versuchsraum durchlief es bei allmählicher Spannungserhöhung den Elektrolyten zunächst wie ein Wetterleuchten; dann erschienen glitzernde Pünktchen zuerst an der Trennungsfläche von Luft und Elektrolyt, die nach oben und unten sprangen, bald überall auf dem Aluminium aufflimmerten und wieder verschwanden, immer größer wurden und schließlich wie Glüh-

---

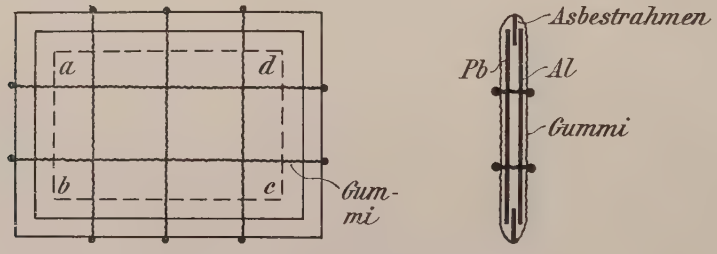
[1]) E.T.Z. 1899, Heft 29, S. 510.

[2]) Nach der Heinkeschen Bezeichnung (a. a. O.).

würmchen leuchteten. Zuletzt konzentrierten sie sich an der unteren Spitze des Aluminiumstiftes, bezw. an den Rändern und Ecken der Aluminiumplatte zu einem Lichtbogen, der beim Herausziehen des Aluminiums aus der Flüssigkeit mit hellem, weißen Licht zwischen Aluminium und Elektrolytoberfläche leicht erhalten bleiben konnte: all dies bei ziemlich stabilem Charakter des Stromes. Ja es konnte bei ganz hohen Spannungen (etwa 200 Volt) beobachtet werden, daß die ganze Anode in $NaHCO_3$ in violetten Flammen stand, wobei sehr starke Ozonisierung der Luft konstatiert wurde.

Diese Leuchterscheinung ist ebenso schön, wie unerwünscht wegen der Zerstörung des Aluminiums an seinen Ecken und an der Oberfläche der Flüssigkeit. Man überzieht zweckmäßig die gefährdeten Stellen mit Siegellack oder mindestens Schellack; besonders guten Schutz bietet Formierung bei höherer Spannung als der maximalen Betriebsspannung. Bei den Versuchen Nr. 10, 19 u. ff. habe ich mit

Fig. 3.



a b c d Stromübergangsfläche.

gutem Erfolg durch Zwischenlegen von Asbest- oder Papperähmchen zwischen die beiden plattenförmigen Elektroden die Ränder des Aluminiums wirksam geschützt, zugleich die Elektroden in gewünschtem geringen Abstand gehalten und die Stromübergangsfläche genauer vorgeschrieben. Die ganze Elektrodenanordnung wurde durch Gummibänder zusammengehalten.

Was die Höhe der Spannungen anlangt, bei denen der Strom noch praktisch vollkommen gedrosselt wurde, sei hier erwähnt, daß ich im günstigsten Fall bei Alaunlösung bis 40 Volt, bei 7 %iger $NaHCO_3$-Lösung bis 232 Volt kam.

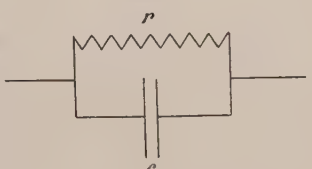
Die Erklärung der oben angeführten Erscheinungen deckt sich zwanglos fast wörtlich mit der von Heinke gegebenen Erklärung der Wehnelterscheinungen [1]), wenn man nur an Stelle des Pt sich

[1]) Siehe Heinke, Ueber Wellenstromerreger. Ann. d. Ph. 4. Folge, Bd. 1, 1900, S. 329 bis 336.

Al und an Stelle der Gasschicht, von der dort immer die Rede ist, sich die Al_2O_3-Schicht denkt. Ich glaube sogar, daß, für meinen Fall angewendet, die dortigen Ausführungen womöglich noch einwandfreier sind, weil hier Zweifel, ob man wirklich Kapazität hat, ausgeschlossen sind.

Die Aluminiumelektrolytzelle im Gleichstrombetrieb charakterisiert sich demnach als ein Wellenstromerreger, für dessen inneres Verhalten man die folgende schematische Schaltung zu Grunde legen kann, bei der c die veränderliche Kapazität der Oxydschicht und r den Ohmschen Widerstand der nicht oxydbedeckten Stellen (Poren, Ventile) des Aluminiums bedeutet. Was a. a. O. über das Auftreten von Schwingungen nach der Gleichung $z = \frac{1}{c}\sqrt{\frac{1}{CL}}$ [1]) und die Anpassungsfähigkeit des elektrolytischen Wellenstromerregers gesagt ist, gilt auch hier.

Fig. 4.



b) Quantitative Versuche zum Studium des Gleichstromformierungsvorgangs.

Es wurden wenige quantitative Gleichstromversuche angestellt, nur um den Wellenstromcharakter der Erscheinung, den Einfluß der Größe und der vorhergegangenen Beanspruchung der Anode und der Stärke des Formierungsstromes einigermaßen zu veranschaulichen. Auf die Behandlung der energetischen Seite des Vorgangs wurde ganz verzichtet. Trotz dieser Beschränkung bietet die Versuchsreihe 1 eine Anzahl bemerkenswerter Resultate.

Versuchsreihe 1. (Formierungsversuche im SO_4H_2-Elektrolyten.)

Versuchsverhältnisse. Schaltungsschema s. nächste Seite. Bezeichnungen[2]): $\overline{J}$ = Gleichstromamperemeter, $\overline{E}$ = Gleichstromvoltmeter, $\tilde{\overline{J}}$ = Wellenstromamperemeter (Hitzdrahtinstrument), $\tilde{\overline{E}}$ = Wellenstromvoltmeter (Hitzdrahtinstrument). Elektrolyt: SO_4H_2 (vom spez. Gew. 1,21), ca. 1½ Liter in einem Glasgefäß von 12 cm Durchmesser. Elektroden:

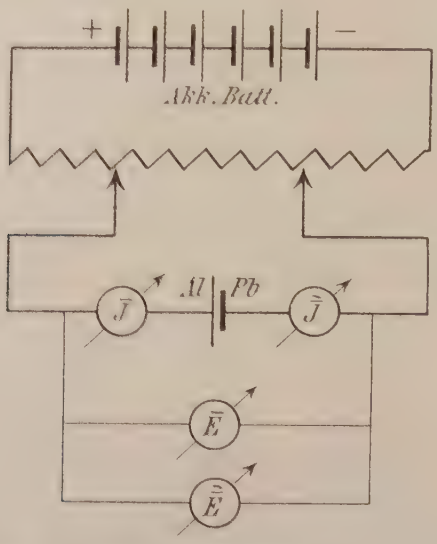
---

[1]) c bedeutet hier eine Konstante, für Sinusstrom = π, C die Kapazität, L die Selbstinduktion.

[2]) Ich bezeichne im folgenden durchweg Gleichstrom mit dem Zeichen —, Wechselstrom mit dem Zeichen ∾, Wellenstrom mit dem Zeichen ≃.

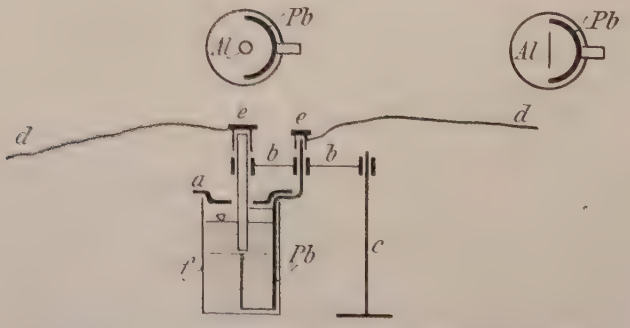
Kathode: Halbzylindrisch gebogene Bleiplatte, Biegungsdurchmesser 12 cm, Eintauchtiefe 12 cm, einfache wirksame Fläche 226 qcm (bei

Fig. 5.



allen Versuchen mit 1 Zelle verwendet). Anode: Aluminium, Stift oder Platte. (NB. Eine Verdrehung der Aluminiumplatte um 90° ergab hier keinen Einfluß.) Schema der Zelle:

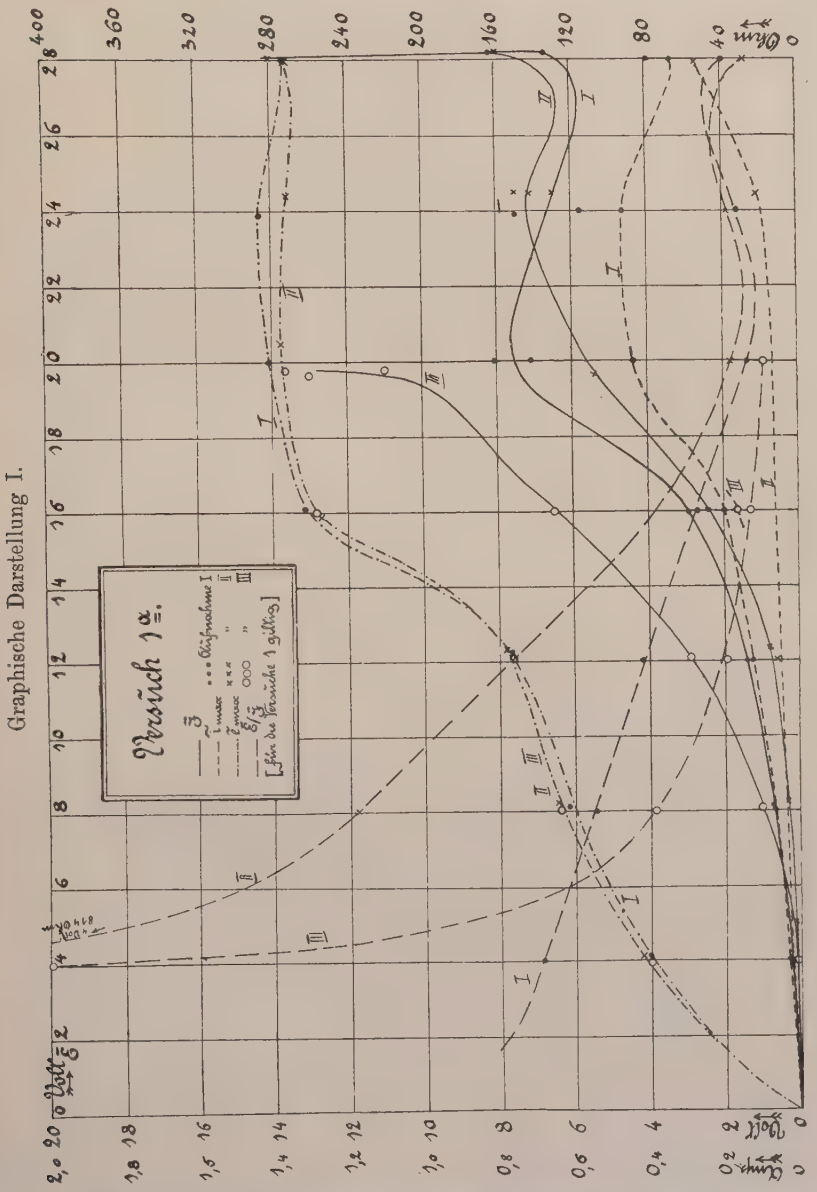
Fig. 6.



a) Deckel } aus Isolations-
b) Halter } material,
c) Stativ,
d) Zuleitungsdrähte,
e) Klemmen,
f) Glasgefäß.

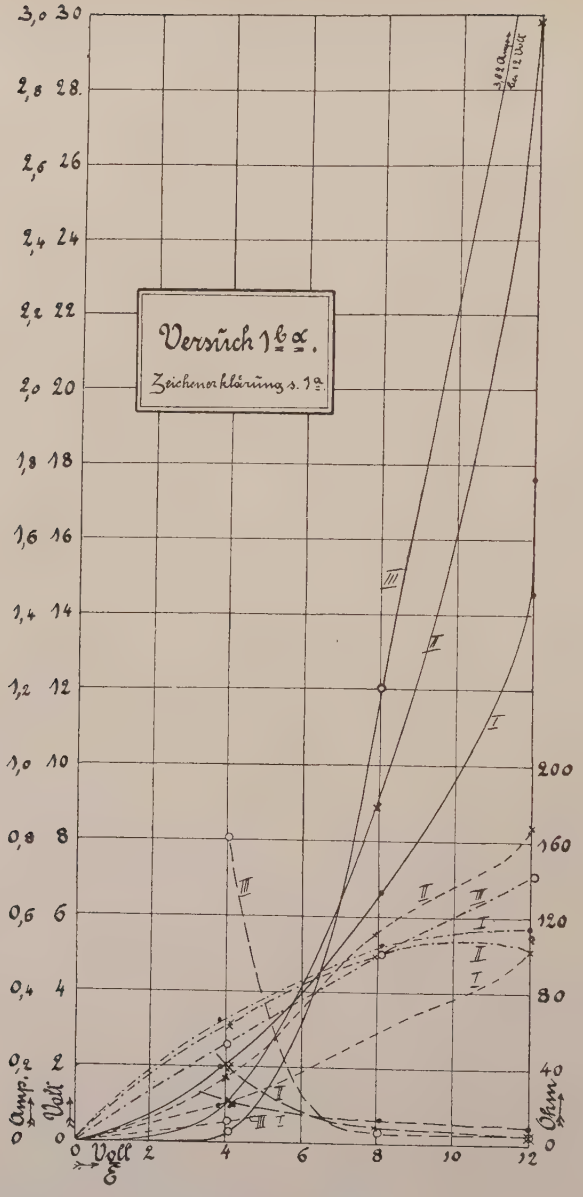
Ausführung der Versuche: Beobachtungen bei je 10 (bezw. 5) Minuten lang konstant gehaltener Spannung von 0, 4, 8, 12, 16 etc. Volt; mehrfache Wiederholung einer solchen Reihe jedesmal bis zum Ab-

schnappen. Während einer Reihe wurde niemals ausgeschaltet; die Reihen wurden mit I, II, III numeriert. Aufnahme von $\bar{E}$, $\tilde{E}$, $\bar{J}$ und $\tilde{J}$.



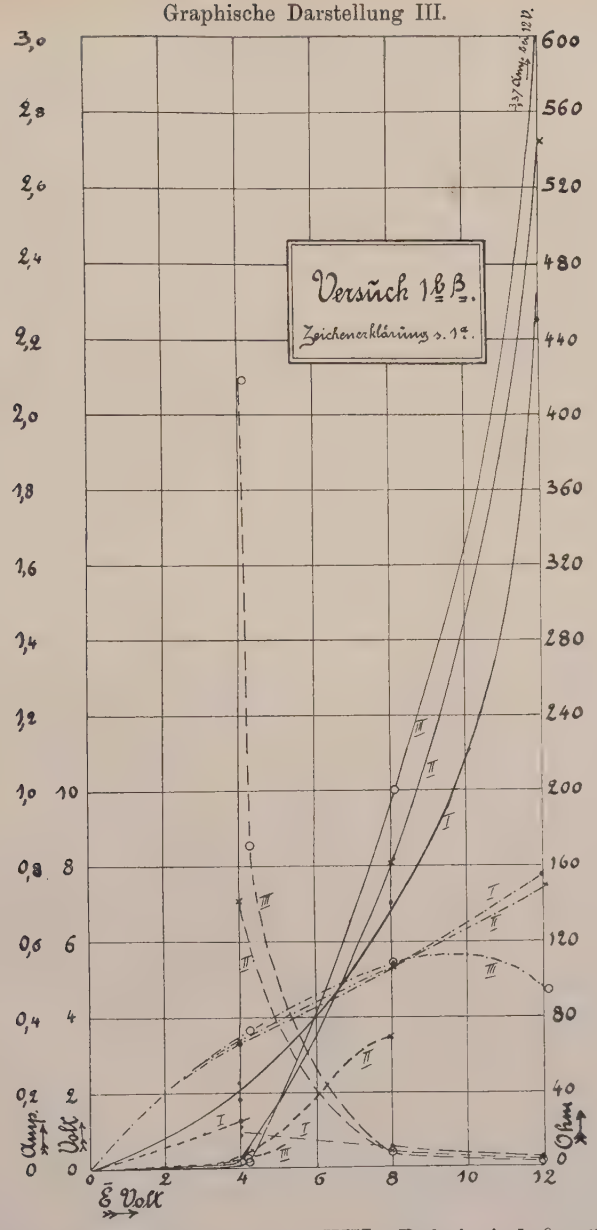
Korrekturen: Die aufgenommenen elektrischen Werte wurden nach den Eichkurven der Instrumente korrigiert, der Spannungsabfall in

Graphische Darstellung II.



den Strommessern von den Angaben der Spannungsmesser subtrahiert, so daß die in der Zahlentafel S. 114 u. 115 des Anhangs mitgeteilten Werte direkt die Spannungen und Ströme der Zelle bedeuten. Die Versuchswerte entnehme man der Zahlentafel S. 114 u. 115 des Anhangs und

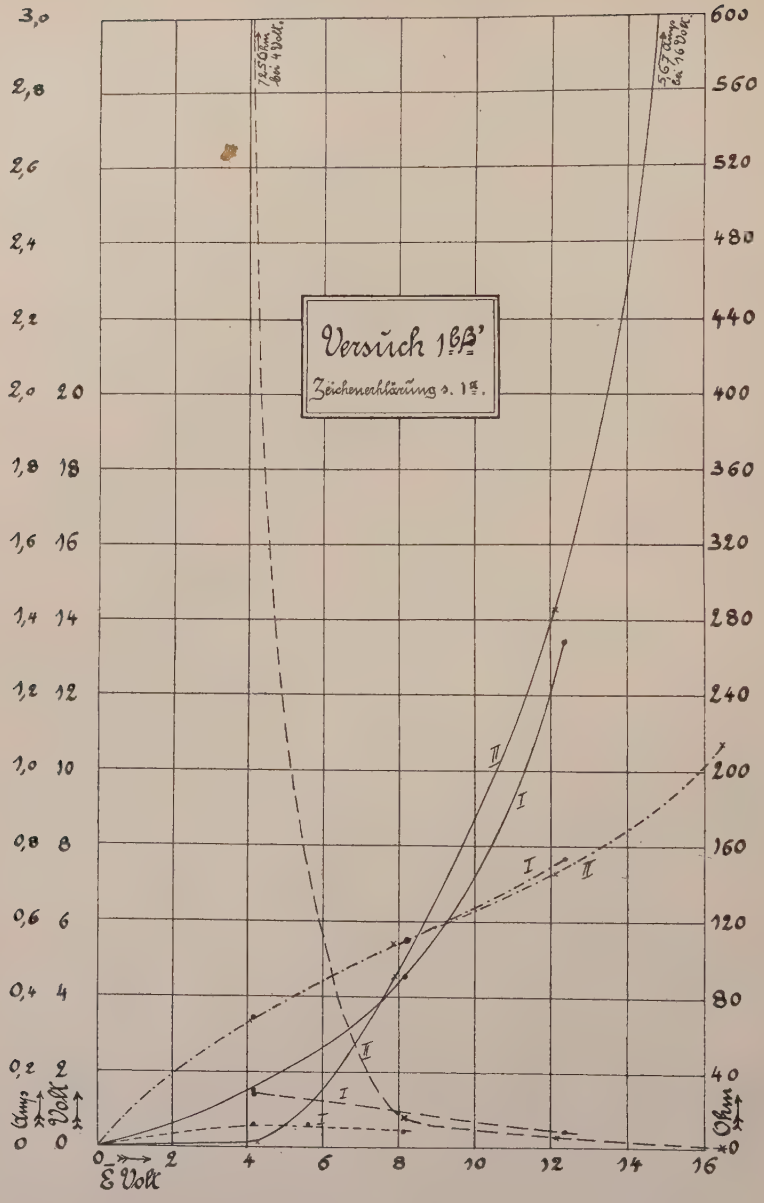
Graphische Darstellung III.



den graphischen Darstellungen I bis VIII. Dabei sind für äquivalenten Sinusstrom aus den Wellenstrom- und Gleichstromwerten die Maximalwechselstromwerte nach den Lehren vom Wellenstrom [1]) berechnet zu:

[1]) Siehe Heinke, Ueber Wellenströme. E.T.Z. 1899, Heft 29, S. 510.

Graphische Darstellung IV.



$$\tilde{e}_{max}\,^{1}) = \sqrt{2\,(\tilde{E}^2 - \overline{E}^2)} \quad \text{und} \quad \tilde{i}_{max} = \sqrt{2\,(\tilde{J}^2 - \overline{J}^2)}.$$

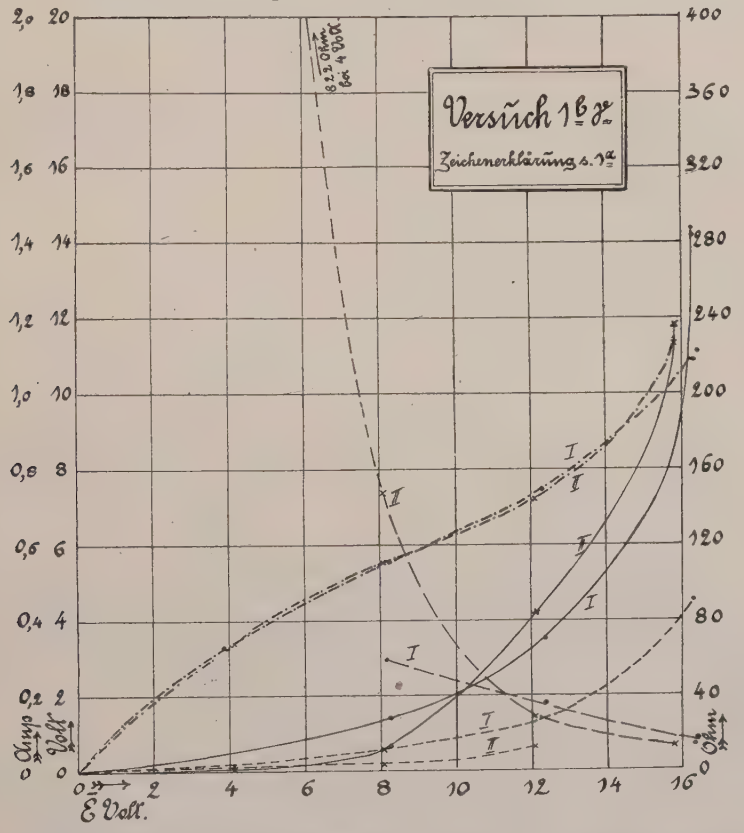
[1]) Ich bezeichne Mittel- und Effektivwerte durchweg mit großen, Momentanwerte mit kleinen Buchstaben.

Ferner ist ein resultierender Ohmscher Widerstand $\bar{R} = \frac{\bar{E}}{\bar{J}}$ angegeben.

Besprechung der Versuchsresultate.

Allgemeines: Die in Versuchsreihe 1 vorliegenden Werte geben einige besonders charakteristische Fälle der Gleichstromformierung von SO_4H_2-Elektrolytzellen wieder.

Graphische Darstellung V.

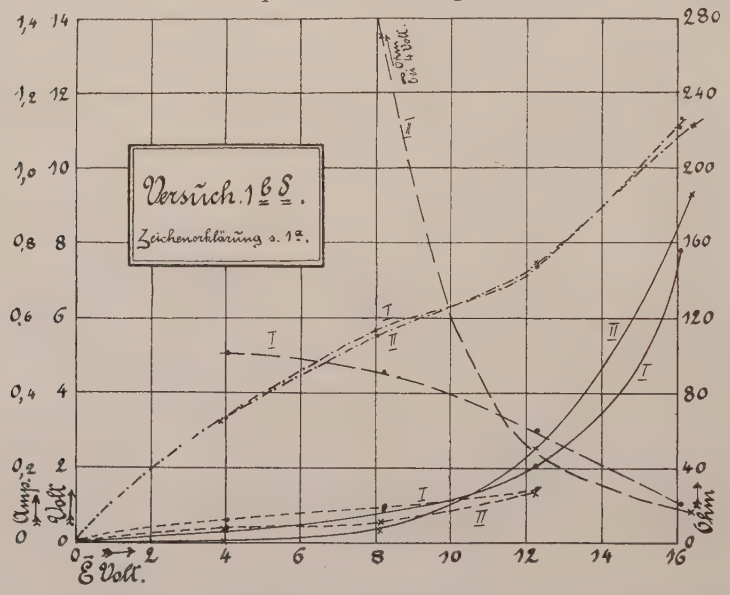


In 1a ist ein Aluminiumstift (Oberfläche 706 qmm) verwendet, in 1b und 1c sehr dünnes Aluminiumblech. Da nicht zu dünne Stifte bei gleicher (oder sogar kleinerer) Oberfläche einen größeren Querschnitt haben als nicht zu breite dünne Bleche, war es in Versuch 1a möglich, vor dem Abschnappen (s. S. 9, 3.) mit der Spannung bis über 28 Volt zu kommen, während infolge der Stromwärme im Aluminium bei Versuch 1b und 1c das Abschnappen früher erfolgte.

Daß dies tatsächlich in erster Linie eine Temperaturwirkung ist, folgt daraus, daß bei den zeitlich aufeinander folgenden Versuchen I, II, III durchweg bei jedem folgenden das Abschnappen etwas eher eintrat; besonders deutlich ist dies gerade bei Versuch 1a ersichtlich, wo am Schluß der Reihe III die Temperatur des Elektrolyten ca. 30 ° C, die des Aluminiums 50 bis 60 ° C betrug und der Stromdurchbruch daher schon bei wenig mehr als 20 Volt erfolgte [1]).

Jeder der 6 Versuche 1b ist mit frischem Aluminium (von demselben Blechstück geschnitten) ausgeführt. Der Versuch 1b soll den

Graphische Darstellung VI.



Einfluß der Größe der Aluminiumoberfläche zeigen. (Variationen von 5940 bis 370 qmm einseitiger Fläche.)

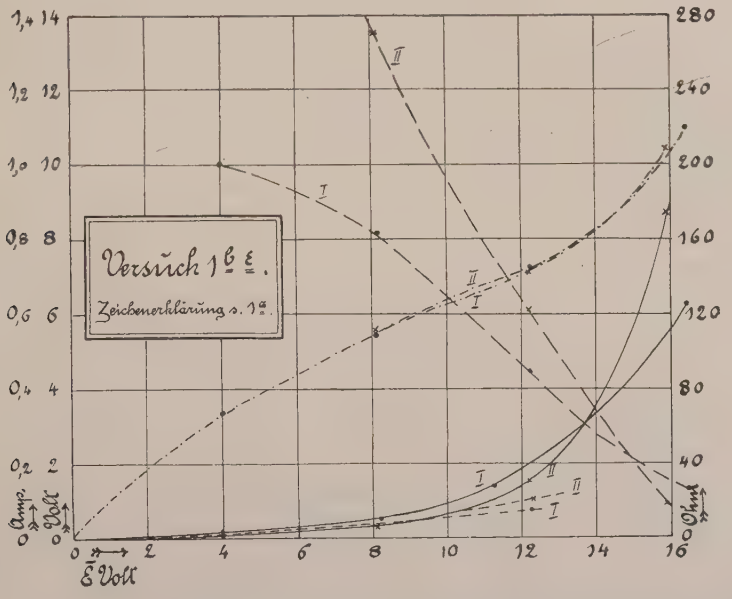
Bei 1b α (Fläche 5940 qmm einseitig) erfolgte das Abschnappen bei 14 Volt, bei 1b β (Fläche 2970 qmm einseitig) bei 14 ½ Volt. Es

[1]) Nach Abschluß der vorliegenden Arbeit erschien in der Zeitschr. f. Elektrochemie, 10. Jahrg., 1904, Nr. 46 eine Abhandlung von Franz Fischer, in der nachgewiesen ist, daß bei ausgezeichneter Kühlung der Al-Anode auch bei SO_4H_2-Elektrolyten eine Drosselung des Stromes bis zu sehr hoher Spannung möglich ist und daß der Durchbruch (das Abschnappen) tatsächlich auf ein Zerreißen der Isolierschicht durch Wasserdampf zurückzuführen ist. Auch über das Verhältnis von Dicke der Oxydschicht zur Zellenspannung und von Auflösungsgeschwindigkeit der Schichtensubstanz zur Endstromstärke bei der Formierung finden sich in dieser Arbeit bemerkenswerte Aufschlüsse.

gelang in diesem Fall trotz Halbierung der Fläche nicht, bis zu wesentlich höherer Spannung zu kommen, weil bei 1 b β das Blech halb so breit (27 mm gegen 54 mm) war, also der Querschnitt geringer, die Erwärmungswirkung des Jouleschen Stroms im Aluminium größer war. Bei der Wiederholung 1 b β′ dieses Versuchs (mit neuem Blech) kam ich später doch bis über 16 Volt.

Bei 1 b γ erfolgte das Abschnappen erst nach $16^1/_2$ Volt (27 mm Breite wie bei 1 b β, aber halbe Fläche, nämlich 1430 qmm einseitig). Bei noch kleineren Oberflächen konnte ich den Durchbruch nie bis

Graphische Darstellung VII.

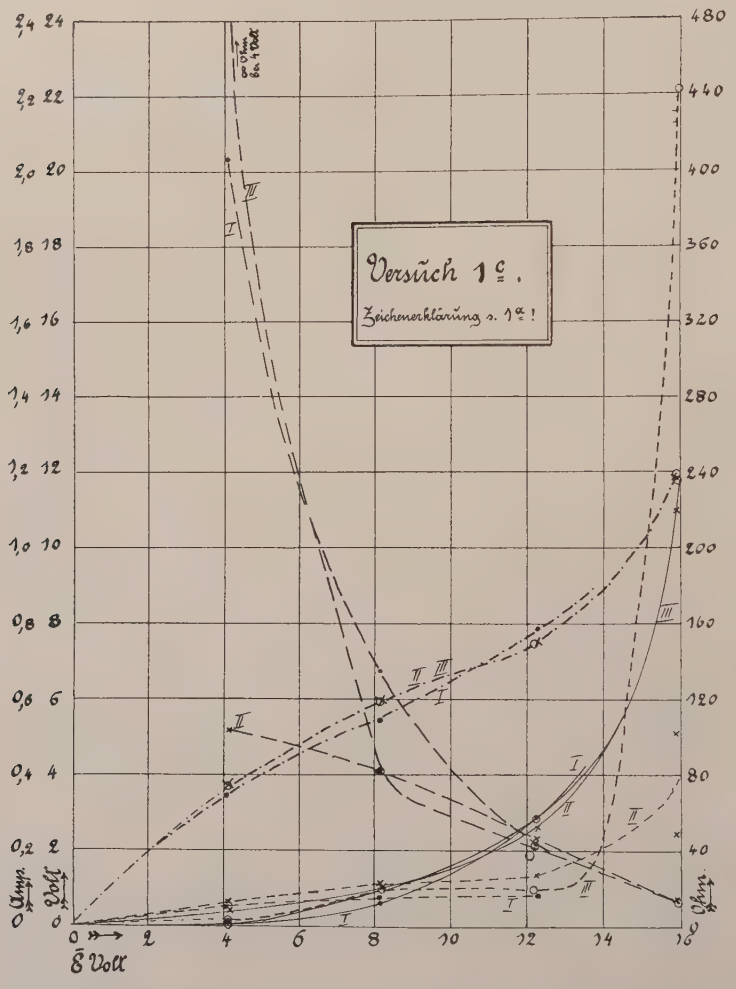


über 20 Volt hintanhalten; wohl aber trat er merklich später ein, bei Versuch δ nach 18 Volt, bei Versuch ε bei 20 Volt. In der Tat ist also (abgesehen von der Temperaturwirkung bei kleineren Flächen) die Formierung bis zu höheren Spannungen wirksam (Annäherung an die Wehneltwirkung).

Versuch 1 c soll zeigen, ob es einen Unterschied ausmacht, wenn ein Blech einmal durch Strom, der von 0 Amp. bis zum Abschnappstrom beständig variiert, ein ander Mal durch niederen Strom, ein drittes Mal durch konstanten ziemlich hohen Strom formiert wird. Es ergibt sich, daß die letztere Formierungsart den Vorzug verdient, weil hier bei 16 Volt $\bar{J}$ erst 1,2 Amp. beträgt (s. auch S. 22).

Das Hauptresultat der Versuchsreihe 1 aber ist, daß die Wellenstrominstrumente durchweg höhere Werte zeigen als die Gleichstrominstrumente, daß wir es bei der Aluminiumzelle im Gleichstrombetrieb

Graphische Darstellung VIII.



also tatsächlich mit einem Wellenstromerreger zu tun haben, ganz wie bei dem Wehneltunterbrecher.

Spezielles: Die Kurvenblätter 1 stellen abhängig von den benutzten Gleichspannungen $\overline{E}$ als Abszissen die beobachteten Werte von $\overline{J}$ und die berechneten Werte von $\tilde{i}_{max}$, $\tilde{e}_{max}$ und $\frac{\overline{E}}{\overline{J}}$ als Ordinaten

dar. Bei Versuch 1a tritt die Art des Formierungsvorganges besonders typisch zur Schau: Mit höher werdender Spannung steigt der Gleichstrom; von einer gewissen Stromstärke (ca. $^1/_2$ Amp.) ab sinkt der Gleichstrom während einer Periode (10 Minuten) konstanter Spannung infolge der Formierungswirkung; kurz vor dem Abschnappen steigt er schnell wieder an. So entsteht die charakteristische Form der Formierungskurve ($\bar{J}$-Kurve) in Kurvenbeilage 1a[1]) mit dem Sattel (bei 1aI zwischen 20 und 28 Volt); bei II beginnt die Erwärmungswirkung stärker wirksam zu werden, bei III wiegt sie vor, so daß die $\bar{J}$-Kurve dem Charakter der Kurven des Versuchs 1b sich nähert. Am unsichersten ist hier und in den Kurven 1b der Verlauf der $\tilde{i}_{max}$-Kurve. Alle übrigen Kurven dagegen zeigen bei den Versuchen 1a, 1b und 1c einen einheitlichen Charakter (s. graphische Darstellungen I bis VIII).

Die $\bar{J}$-Kurve: Bei niederer Spannung $\bar{J}_I > \bar{J}_{II} > \bar{J}_{III}$ infolge der besseren Formierung bei aufeinander folgenden Versuchen. Bei höherer Spannung $\bar{J}_I < \bar{J}_{II} < \bar{J}_{III}$ infolge der höheren Temperatur bei aufeinander folgenden Versuchen. Dazwischen Ueberschneidung der Kurven. Mit kleiner werdender Fläche lehnen sich die Kurven mehr an die Abszissenachse an (geringerer Strom bei derselben Spannung), rücken I, II, III näher zusammen (schnellere Formierung, so daß geringer Unterschied zwischen I, II, III), die Ueberschneidungspunkte weiter hinaus, erfolgt der Durchbruch später.

Die $\bar{R}$-Kurve $\left(\bar{R} = \frac{\bar{E}}{\bar{J}}\right)$: Die resultierende Ohmsche Widerstandskurve gibt einen besonders brauchbaren Anhaltspunkt für die Güte der Formierung. Bei niederer Spannung: $\bar{R}_I < \bar{R}_I < \bar{R}_{III}$ infolge der Formierungswirkung, bei höherer Spannung: $\bar{R}_I > \bar{R}_I > \bar{R}_{III}$ infolge der Temperaturwirkung. Mit kleiner werdender Oberfläche werden die Anfangswiderstände (bei niederer Spannung) größer und rücken die Ueberschneidungspunkte (in der graphischen Darstellung) nach rechts. Der Widerstandsabfall bei wachsender Spannung ist sehr groß, von praktisch ∞ bis auf wenige Ohm.

Die $\tilde{e}_{max}$-Kurve: Diese Kurve ist fast unabhängig von Fläche u. dergl., d. h. sowohl bei verschiedenen Versuchen als bei verschiedenen Reihen I, II, III desselben Versuchs ungefähr dieselbe. Bei allen Versuchen stellt sich offenbar zu einer gewissen Gleichspannung sofort eine ganz bestimmte Wechselspannung am Elektrolyten ein.

---

[1]) Spannung $\bar{E}$ als Abszisse.

Bei SO_4H_2-Elektrolyten scheint von ca. 16 Volt ab (wenn nicht vorher der Durchbruch erfolgt) dieses e_{max} ziemlich konstant (13 bis 14 Volt) zu bleiben. Wenigstens nähern sich die Kurven 1b immer mehr dem Charakter von 1a an, zu je kleineren Flächen man übergeht.

Der Versuch 1c ergibt, daß bei vorangehender Formierung durch mäßig starken Strom der Ohmsche Widerstand praktisch auf ∞ gebracht werden kann, während Formierung durch niederen Strom bei weitem nicht so wirksam ist. Er zeigt aber auch, daß der Unterschied der vorhergehenden Formierung sehr bald sich ausgeglichen hat, so daß schon von 12 Volt ab keine der Kurven von der anderen mehr abweicht, als die Labilität der Beobachtung überhaupt bedingt. Es ist daher auch in den Wechselstromversuchen auf vorhergehende hervorragend gute Gleichstromformierung bei kleinen Elektroden kein so großer Wert zu legen, wie dies Pollak z. B. offenbar tut.

Die im vorigen besprochenen Versuche wurden auf andere Elektrolyten nicht ausgedehnt, weil die Wellenstromerscheinung umsoweniger ausgesprochen auftrat, je mehr man sich dem idealen Gleichrichter näherte, was gleichbedeutend ist mit einer Entfernung vom Wehneltcharakter. Bei $NaHCO_3$-Lösung z. B. konnte nur kurz vor dem Durchbruch im Gleichstrombetrieb eine mit Starkstrominstrumenten meßbare Differenz von $\overline{E}$ und $\hat{E}$, $\overline{J}$ und $\hat{J}$ konstatiert werden. Im allgemeinen äußerte sich der Wellenstromcharakter in ganz leisem Vibrieren des Zeigers der Gleichstrominstrumente und vereinzelten stärkeren Ausschlägen bei Partialdurchbrüchen des Stromes.

Aus einer größeren Zahl von Gleichstromformierungsversuchen in anderen Elektrolyten greife ich im folgenden nur einige beispielsweise heraus (Versuchsreihe 2), die zeigen,

1. daß die Formierung in Mg.citr.-Lösung langwierig und nicht gut ist,

2. daß die Formierung in $NaHCO_3$-Lösung schnell vor sich geht und gut ist,

3. daß sich Stifte schneller und besser formieren als Platten (allgemein kleine Oberflächen schneller und besser als große Oberflächen).

Versuchsreihe 2.

Versuche 2a: Formierung von Aluminiumplatten von 150/120/1 mm in 1½ %iger Mg.-citr.-Lösung[1]).

[1]) Siehe S. 2, Fußnote 1.

2aα: Zeitversuch.

Zeit: Nach	0	1	2	3	4	5	9	16	24	30	42	50	150	Min.
$\overline{E}$	110	konstant											110	Volt
$\overline{J}$	8	2,3	1,6	1,25	0,9	0,8	0,5	0,4	0,3	0,3	0,28	0,28	0,25	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	13,7	—	—	—	—	137	—	—	—	367	—	—	440	Ohm

2aβ: Vergleich der Widerstände von Elektrolyten mit drei gleichen Platten (wie bei 2aα) **bei verschiedenen Spannungen** $\left(\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}\right)$.

Werte von $\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$ (Ohm).

Volt	Platte 1	Platte 2	Platte 3
125	—	—	250
110	230	230	500
100	—	—	1000
90	500	500	2000
75	1000	1000	—
70	—	—	10000
65	2000	2000	—
60	3000	3000	—
50	—	10000	—
45	10000	—	—

Versuche 2b: Formierung von Aluminiumplatten von 150/120/1 mm in 6- bis 8%iger $NaHCO_3$-Lösung.

2bα: Zeitversuch.

Zeit: Nach	0	15	30	40	Min.
$\overline{E}$	—	219	221,6	220,4	Volt
$\overline{J}$	0,5	0,2	0,06	0,042	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	—	1095	—	5250	Ohm

2bβ: Zeitversuch.

Zeit: Nach	0	5	30	40	Min.
$\overline{E}$	—	219,7	220,5	222	Volt
$\overline{J}$	0,5	0,13	0,08	0,04	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	—	1698	—	5550	Ohm

Die Formierung geht also schneller vor sich wie bei Mg.-citr.-Lösung, und bei 220 Volt ist der Widerstand hier so groß wie dort bei 50 Volt.

Versuche 2c: Formierung von Aluminiumstiften von 130 bis 140 mm Länge in $NaHCO_3$-Lösung (wie bei 2b).

2cα: Zeitversuch mit 7 bis 8 mm starkem Stift.

Zeit: Nach	0	3	5	10	Min.
$\overline{E}$	—	214	214	216	Volt
$\overline{J}$	0,5	0,05	0,04	0,03	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	—	4280	5350	7200	Ohm

2cβ: Zeitversuch mit 5 mm starkem Stift.

Zeit: Nach	0	1	2	Min.
$\overline{E}$	—	219	218	Volt
$\overline{J}$	0,5	0,04	0,02	Amp.
$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$	—	5475	10 900	Ohm

Kleinere Elektroden formieren sich also schneller als größere und haben bei gleichen Spannungen größeren Widerstand.

Nach Erledigung dieser Gleichstrom-Vorversuche gehe ich über zu der Untersuchung von Aluminiumelektrolytzellen im Wechselstrombetrieb im Bereich der seltenen und schwachen Wehneltunterbrechungen.

II. Wechselstromversuche.

a) Vorbemerkung und Einteilung.

Der erste und Hauptteil der im folgenden angestellten Untersuchungen von Aluminiumelektrolytzellen im Wechselstrombetrieb beschäftigt sich mit den Vorgängen in einer einzelnen Zelle, die mit einem bifilaren (oder auch induktiven) Widerstand in Serie an den Generator angeschlossen ist. Es wurde dabei fast ausschließlich mit $NaHCO_3$-Lösung [1]) gearbeitet und zwar zunächst und hauptsächlich mit eigentlichen Gleichrichterzellen (Al- und Pb-Elektroden) und dann auch beiläufig mit Kondensatorzellen (2 Al-Elektroden). Als zweiter Teil folgt dann eine kurze Behandlung der Wirkungsweise von Gleichrichterbatterien (in der Graetz-Pollakschen Vierzellenschaltung, s. S. 3, Fig. 1) unter Zugrundelegung der mit einer Zelle gewonnenen Erfahrungen.

b) Versuchsmethoden und -anordnungen.

Die Versuche an Aluminiumzellen im Wechselstrombetrieb müssen sich wie die meisten Wechselstromuntersuchungen nach 2 Richtungen erstrecken:

1. Es muß der Strom- und Spannungsverlauf in der Periode dargestellt werden [Aufnahme von Momentanwerten von Strom und Spannung und Zusammenstellung derselben zu Strom- und Spannungskurven]. (Differentialwerte.)

2. Es müssen die Mittel- und Effektivwerte und die resultierenden Leistungswerte bestimmt werden (Integralwerte).

Zum Zweck dieser Messungen wurden die folgenden Versuchsanordnungen getroffen:

1. Aufnahme von Momentanwerten mit Kontaktmacherschaltung.

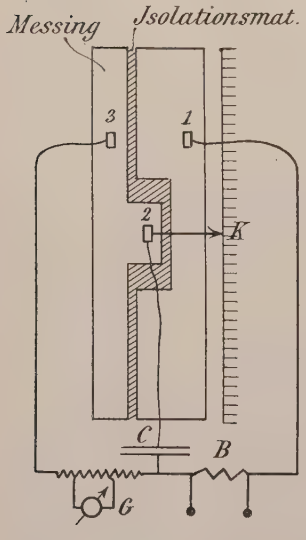
Die Momentanwerte von Spannung und Strom konnten sehr genau und gut aufgenommen werden durch Anwendung einer Kontaktmachervorrichtung, die seit längerer Zeit am elektrotechnischen Institut der technischen Hochschule München in Gebrauch ist (s. Fig. 7).

---

[1]) Nur ganz ausnahmsweise mit Mg.-citr.-Lösung. Es konnte kein Unterschied bemerkt werden bei Lösungen von 6 bis 8 Gewichtsteilen $NaHCO_3$ auf 100 Gewichtsteile H_2O (hier immer 6%ige oder 8%ige Lösung nicht ganz korrekt genannt).

An den Enden eines bifilaren Widerstandes, durch den der zu messende Strom fließt (kleiner Widerstand) oder der an der zu messenden Spannung liegt (großer Widerstand), hat man in jedem Augenblick eine Spannung, die dem Momentanstrom, bezw. der Momentanspannung proportional ist; wenn man nun bis zu dem betreffenden Moment einen Kondensator mit dieser Spannung lädt, gerade in dem Moment unterbricht und dann den Kondensator sich auf ein Galvanometer entladen läßt, so erhält man einen Ausschlag proportional der Ladespannung, also der zu messenden Größe. Einen Dauerausschlag bekommt man durch Ladung und Entladung bei jeder Umdrehung der Maschine [1]).

Fig. 7.



Auf der Welle der Maschine sind 2 voneinander isolierte Metallscheiben aufgebracht, deren Oberflächen ich in ihrer Abwicklung darstelle:

Auf den Flächen schleifen 3 Bürsten. Während ca. $^4/_5$ der Umdrehung sind 1 und 2 miteinander durch die Metallscheibe verbunden (Ladung des Kondensators von der zu messenden Spannung B aus), während weniger als $^1/_5$ findet Entladung durch Verbindung von 2 und 3 auf das Galvanometer G statt. Die Bürsten 1 und 3 sind fest, 2 kann längs einer Kreisteilung verschoben werden, so daß der Uebergangspunkt von Ladung zu Entladung beliebig eingestellt werden kann.

Die Ladung variiert mit der Größe des Widerstands B, der Kapazität C und der Tourenzahl der Maschine (Zahl der Ladungen und Entladungen). Die Vorrichtung muß daher für jede vorgenommene Aenderung dieser Größen geeicht werden, indem man durch B und ein Normalamperemeter einen Gleichstrom schickt oder B parallel zu einem Normalvoltmeter an eine Gleichspannung hängt. Es darf dann:

1. Bei Verschiebung der mittleren Bürste keine Aenderung des Ausschlags von Galvanometer G erfolgen,

2. der Ausschlag muß (c. p.) proportional der Tourenzahl sein,

---

[1]) Siehe Sammlung elektrotechnischer Vorträge von Prof. Dr. Voit: Ueber Kommutierungsvorgänge und zusätzliche Bürstenverluste von Dr.-Ing. Adolf Railing, Bd. IV, S. 274.

3. bei gleicher Tourenzahl muß der Ausschlag proportional der Gleichspannung, bezw. dem Gleichstrom sein.

All diese Bedingungen konnten ausgezeichnet erfüllt werden; die Eichkurven sind trotz ganz großen Maßstabs von Geraden nicht zu unterscheiden.

Dagegen gelang es nicht immer, eine kleine Korrektur zu vermeiden. Das Galvanometer zeigte [1]) einen kleinen konstanten Ausschlag (bei Stromlosigkeit), der sich im Verlauf von Tagen etwas änderte. Die Eichkurven gingen daher auch nicht genau durch den Nullpunkt des Koordinatensystems; durch Addition, bezw. Subtraktion des konstanten Galvanometerausschlags wurden sie völlig genau in den Nullpunkt verschoben.

Vor der eigentlichen Messung wurden die Ausschläge ungefähr an den Maximalpunkten der Kurve so lange beobachtet, bis sie sich in längerer Zeit nicht mehr merklich änderten. Die Kreisteilung umfaßte im vorliegenden Fall für eine Periode 120° (6polige Maschine); der Endpunkt einer Kurve liegt unter einem anderen Pol als der Anfangspunkt, stimmt daher mit diesem nicht vollkommen überein; außerdem fanden auch Verschiebungen der Kurve (d. h. Aenderung von Strom und Spannung) während der Aufnahmen statt. Nur in einzelnen Fällen wurde zur Konstatierung dieser Verschiebungen zuerst eine Serie von Punkten in größeren Abständen voneinander aufgenommen, dann eine Serie diesen benachbarter Punkte u. s. f.; dabei konnte aber keine gesetzmäßige Aenderung festgestellt werden. Viel zweckmäßiger schien es daher, alle Punkte in einer Serie aufzunehmen, wobei dann für benachbarte Punkte sicherlich (wegen der kleinen Zeitdifferenz zwischen ihrer Aufnahme) noch keine Aenderung anzunehmen war, so daß ihre relative Lage sehr gut bestimmt werden konnte.

Im allgemeinen waren jedoch die Kurven sehr stabil; einzelne Kurven sind im Verlauf eines Tages aufgenommen und zeigen kaum eine Verschiebung; bei anderen wurde die Aufnahme unterbrochen und erst nach Tagen fortgesetzt, wenn Kontrollen der Werte der früheren Aufnahmen gut stimmten.

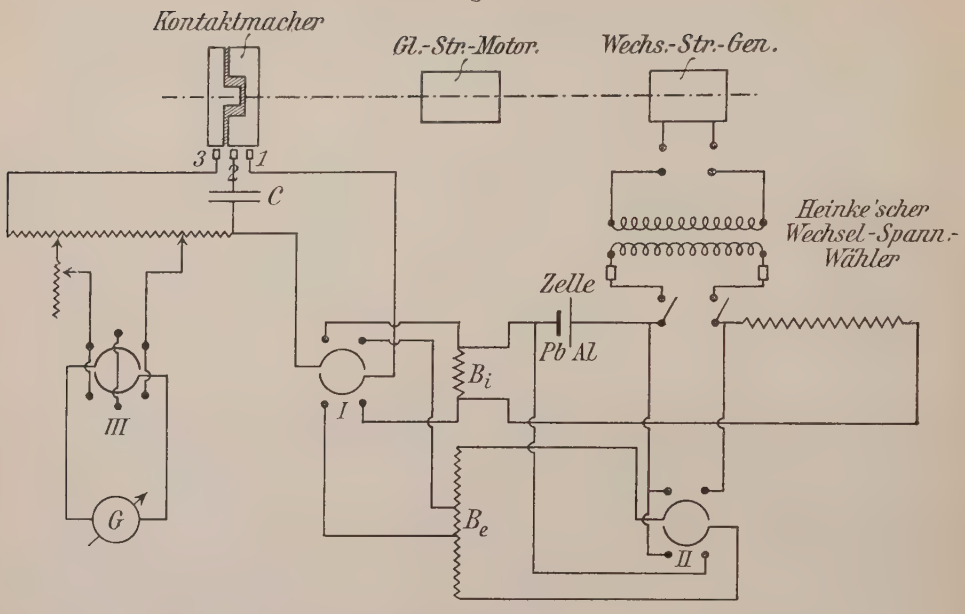
1. Versuche an einer Zelle.

Zur Kurvenaufnahme an einer Zelle wurde folgendermaßen geschaltet:

---

[1]) wohl infolge von Thermoströmen (zwischen Kohlenbürsten und Metallscheiben erzeugt).

Fig. 8.



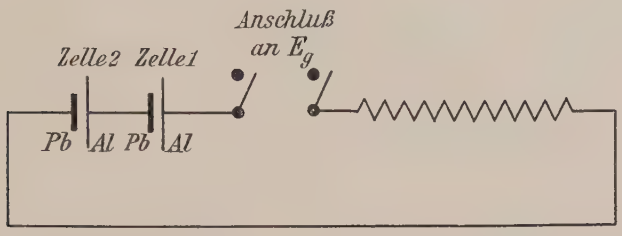
Durch den Umschalter I konnte entweder von der Spannung an B_i (Strom im Elektrolyten) oder von der an B_e (Spannung) der Kondensator C geladen werden. Durch Umschalter II konnte die Generatorspannung oder die Zellenspannung an B_e gelegt werden. Der Ausschlag am Galvanometer G wurde durch Umschalter III kommutiert und die Summe der Ausschläge mit dem Vorzeichen des ersten Ausschlags stets zu Grunde gelegt. Ferner war eine Schaltvorrichtung (nicht eingezeichnet) vorhanden, durch welche die Zelle ausgeschaltet und dann ein Gleichstrom durch B_i und ein Normalamperemeter geschickt werden konnte; ebenso konnte B_e an eine Gleichspannung (mit Normalvoltmeter) gelegt werden. [Eichung des Kontaktmachers.]

Aufgenommen wurden folgende Kurven:

1. Generatorspannungskurve,
2. Zellenspannungskurve,
3. Stromkurve. Daraus konnte berechnet werden
4. die Kurve der Konsumspannungen (als Differenzenkurve zwischen Generatorspannungskurve und Zellenspannungskurve), womit dann der gesamte Stromkreis seinem differentiellen Verhalten nach aufgeklärt erscheint.

1a. Versuche an zwei hintereinander geschalteten Zellen.

Fig. 9.

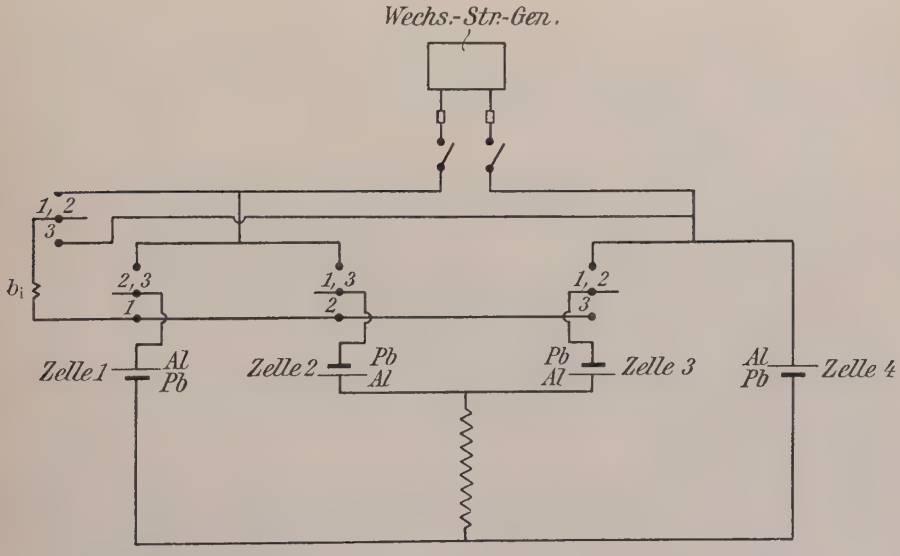


Bei Hintereinanderschaltung von 2 Zellen (mit der einige Versuche angestellt wurden) wurden mit derselben Schaltung wie unter 1. aufgenommen:

1. Generatorspannungskurve,
2. Zellenspannungskurve 1,
3. Zellenspannungskurve 2,
4. Stromkurve.

2. Versuche mit der Vierzellenschaltung.

Fig. 10.



Bei den Vierzellenversuchen wurde durch die vorstehend skizzierte Umschaltvorrichtung ermöglicht, daß ein ganz kleiner bifilarer Widerstand b_i (Größenordnung: Hundertstel Ohm) abwechslungsweise

in den Stromkreis von Zelle 1, 2 oder 3 zur Stromkurvenaufnahme eingeschaltet werden konnte. Die Umschaltehebel müssen dabei für die Strommessung in einer Zelle in die durch die Ordnungszahl der betreffenden Zelle bezeichnete Richtung gelegt werden.

Die Spannungen wurden an den Zellen 1, 2 und 3 gemessen. Es wurden also folgende Kurven direkt aufgenommen:

1. Zellenspannungskurve 1,
2. „ 2,
3. „ 3,
4. Stromkurve 1,
5. „ 2,
6. „ 3.

Durch Rechnung konnten ferner folgende Kurven erhalten werden:

7. Generatorspannungskurve als Summenkurve aus Zellenspannungskurven 2 und 3,
8. Generatorstromkurve als Summenkurve aus Stromkurven 1 und 2,
9. Konsumspannungskurve als Differenzenkurve aus Zellenspannungskurven 1 und 2,
10. Konsumstromkurve als Differenzenkurve aus Stromkurven 2 und 3,
11. Zellenspannungskurve 4 als Differenzenkurve aus Generatorspannungskurve und Zellenspannungskurve 1,
12. Stromkurve 4 als Differenzenkurve aus Generatorstromkurve und Stromkurve 3.

Selbstverständlich wurden immer alle zusammengehörigen Werte für eine Stellung des Kontaktmachers zugleich bestimmt.

B. Aufnahme von Mittel- und Effektivwerten mit „Wellenstromschaltung".

Die Mittel- und Effektivwerte wurden bestimmt nach den folgenden Wellenstromschaltungen (genau im Sinn der von Heinke dafür gegebenen Regeln):

1. Wellenstromschaltung für eine Zelle.

Durch Umschaltevorrichtungen (nicht eingezeichnet) konnten die Nebenschlüsse (Spannungsspule des Wattmeters und Voltmeters)

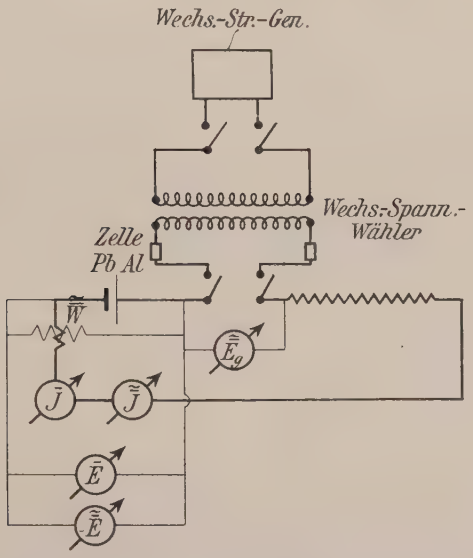
1. an die Generatorspannung gelegt werden,
2. an die Zelle,

3. an (Zelle + Amperemeter + Wattmeterhauptspule),

4. an (Konsumwiderstand + Amperemeter + Wattmeterhauptspule),

5. an Konsumwiderstand allein, so daß in weitestgehender Weise Korrekturen vermieden und, wenn unumgänglich, vorgenommen werden

Fig. 11[1]).



konnten. (NB. Als Wellenstromvoltmeter wurden in der Regel Hitzdrahtvoltmeter mit Glühlampenvorschaltwiderständen benützt.)

2. Vierzellen-Wellenstromschaltung (zugleich für zwei Zellen).

Bei den Vierzellenversuchen wurde nach Fig. 12 geschaltet.

Dieselbe Schaltung wurde bei Hintereinanderschaltung von 2 Zellen verwendet; dabei mußten entweder Zelle 2 und 4 oder Zelle 1 und 3 abgeschaltet werden. Auch die Wellenstrominstrumente konnten direkt am Arbeitsplatz durch eine Umschaltevorrichtung mit den Normalinstrumenten verbunden werden. Sie wurden vor und nach jeder längeren Versuchsreihe geeicht.

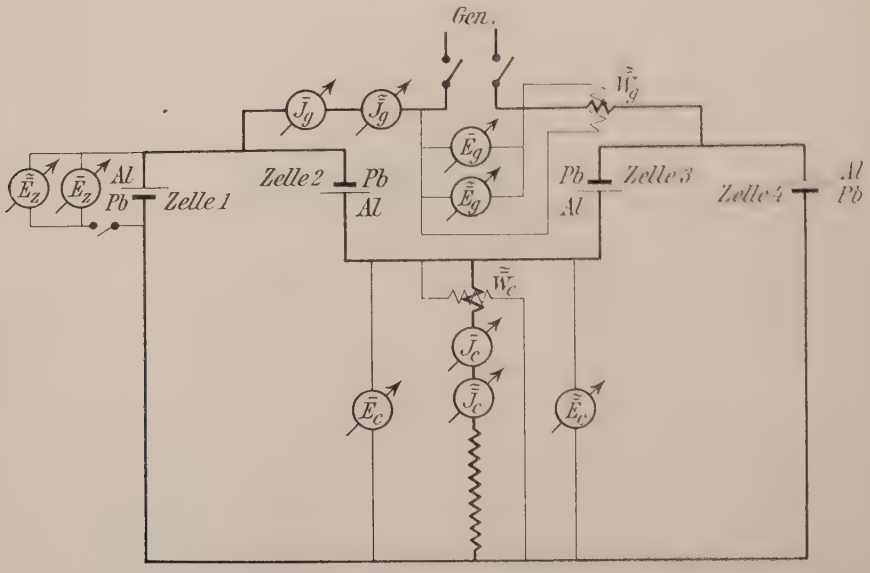
C. Kombination von Kontaktmacher- und Wellenstromschaltung.

Es war schließlich durch eine Umschaltevorrichtung dafür gesorgt, daß Momentanwertversuche mit angeschalteten und abgeschalteten

[1]) — bedeutet Gleichstrom, $\sim$ Wechselstrom, $\simeq$ Wellenstrom.

Wellenstrominstrumenten gemacht werden konnten, d. h. es war möglich, beide Messungen zugleich oder unabhängig voneinander anzustellen. So konnten die aus den Kurven berechneten Mittel- und Effektivwerte nach den Angaben der Instrumente der Wellenstromschaltung kontrolliert werden und umgekehrt. Ferner konnte der Einfluß der Instru-

Fig. 12 [1]).



mente der Wellenstromschaltung auf die Kurvenform etc. untersucht werden, indem z. B. Kurven mit und ohne Wellenstromschaltung aufgenommen wurden.

D. Sonstige Versuchsanordnungen.

Die Zellen wurden stets in primitiver, aber unveränderlicher Form zusammengebaut, teils in runden, teils in viereckigen Gläsern. Es ergaben sich daher die in Fig. 13 wiedergegebenen Grundrißschemata.

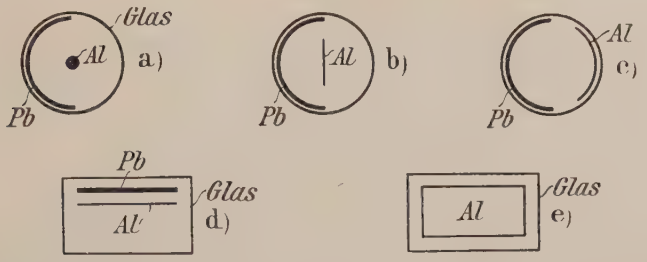
Die Wasserkühlung der Anordnung erfolgte durch die Porzellanschlange eines Ruhmerunterbrechers oder durch eine oder mehrere lange Bleirohrschlangen, die möglichst hart an das Aluminium herangerückt wurden.

---

[1]) Es bedeutet hier und im folgenden stets Index g Generator, c Consum, z Zelle.

Die Gläser waren durch isolierende Deckel abgeschlossen, durch welche die Kühlschlangen, die Stromzuführungen und die Thermometer hindurchgingen.

Fig. 13.



Aluminium vertikal und horizontal verschiebbar bei a, b, c und d. Aluminium über dem Blei vertikal verschiebbar bei e (Grisson-Walter-Anordnung).

Die Distanz wurde gehalten durch schmale Gläser, die von der wirksamen Aluminiumfläche nichts abdecken durften, oder durch Führungen des Aluminiums außerhalb der Flüssigkeit, ferner durch Asbest- oder Papperähmchen und Gummischnur (s. S. 10).

c) Versuchsresultate.

Vorbemerkung über die Variation der Versuchsbedingungen.

Die Variationen der Versuchsbedingungen beziehen sich:

1. auf die Art der Schaltung (1 Zelle, 2 Zellen [1]), 4 Zellen [2])),
2. auf die Art des Elektrolyten ($NaHCO_3$ [3]) und Mg.citr. [3])),
3. auf die Elektroden:
   a) Material (Gleichrichter Pb-Al, Kondensator Al-Al) [4]),
   b) Gestalt, Größe, Abstand [5]),
   c) Lage (stehende, liegende Platten) [6]),
4. auf den Einfluß der Temperatur [7]) (mit und ohne Kühlung),
5. auf den Einfluß der Spannung und Wechselzahl [8]),
6. auf den Einfluß des Konsumwiderstandes [9]) (bifilar, induktiv; Größe).

[1]) Versuch Nr. 10.
[2]) Versuch Nr. 21, 22, 23, 24.
[3]) Versuch Nr. 12, 13.
[4]) Versuch Nr. 20.
[5]) Versuch Nr. 3, 4, 5, 7, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 18, 20.
[6]) Versuch Nr. 12, 21, 22, 23, 24.
[7]) Versuch Nr. 4, 6.
[8]) Versuch Nr. 3, 5, 8, 9, 11, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 21, 22, 23, 24.
[9]) Versuch Nr. 3, 11, 22, 23.

Die Versuche teilen sich zwanglos nach dem ersten erwähnten Gesichtspunkt ein in

1. Versuche mit 1 Zelle (bezw. 2 Zellen),
2. „ „ 4 Zellen.

1. Versuche mit einer Zelle.

α) Gleichrichterzelle.

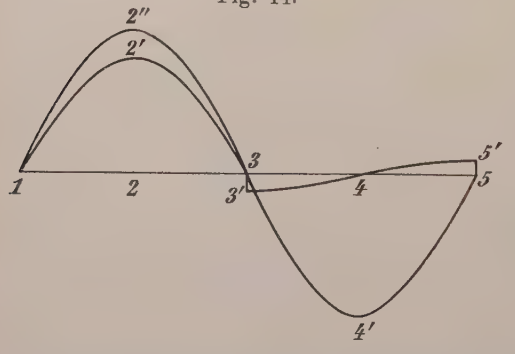
A. Kontaktmacherversuche.

a) Form der Kurven einer idealen Zelle.

Ich führe zunächst den Begriff der idealen Umformerzelle ein, das heißt einer Zelle, die im stande wäre, den Stromimpuls in der Richtung vom Aluminium zum Blei momentan und vollkommen zu drosseln, dem Impuls in der Richtung vom Blei zum Aluminium aber einen Widerstand = 0 entgegensetzte. Durch diese Einführung erhält man (analog wie durch Einführung des Begriffs der idealen Maschine in der Lehre von den Wärmekraftmaschinen oder durch Einführung des Begriffs des idealen Regenerators in der Brennmaterialienlehre) ein Maß dafür, was mit einem elektrolytischen Gleichrichter überhaupt angestrebt werden kann, und für ausgeführte Gleichrichter einen Gütemaßstab. Besonders bei den energetischen Untersuchungen (Umsetzungsgradsuntersuchungen) wird sich diese Betrachtungsweise als sehr fruchtbar herausstellen.

Für sinusförmige Generatorspannung und Belastung durch rein Ohmschen Widerstand würden sich bei einer derartigen Idealzelle folgende Kurven ausbilden:

Fig. 14.

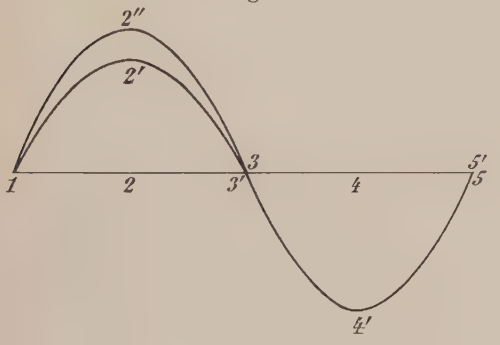


Gen.-Sp. 1, 2″, 3, 4′, 5.
Zellen-Sp. 1, 2, 3, 4′, 5.
Consum-Sp. 1, 2″, 3, 4, 5.
Strom 1, 2′, 3, 3′, 4, 5′, 5.
Ohmscher Strom 1, 2′, 3, 4, 5.
Ladestrom 1, 2, 3, 3′, 4, 5′, 5.

Da der Ladestrom eine Verschlechterung des Wirkungsgrads bedeutet und jedenfalls gering sein wird gegen den Strom in der Rich-

tung Pb — Al, so nehmen wir für den idealen Fall an, er sei gegen den Hauptstrom zu vernachlässigen. Demnach wäre schließlich der ideale Fall der folgende:

Fig. 15.

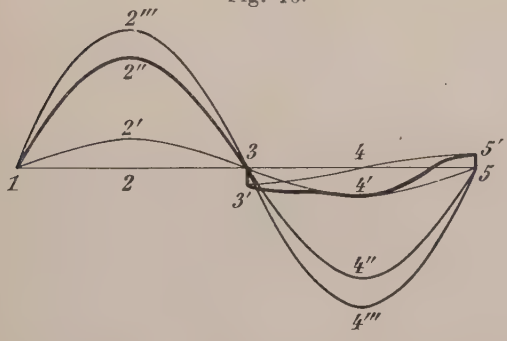


Gen.-Sp. 1, 2″, 3, 4′, 5.
Zellen-Sp. 1, 2, 3, 4′, 5.
Consum-Sp. 1, 2″, 3, 4, 5.
Strom 1. 2′, 3, 3′, 4, 5′. 5.
Ohmscher Strom 1, 2′, 3, 4, 5.
Ladestrom 1, 2, 3, 3′, 4, 5′, 5.

b) In Wirklichkeit zu erwartende Form der Kurven.

In Wirklichkeit werden etwa folgende Kurven zu erwarten sein, wobei der resultierende negative Strom sich aus einem kapazitiven und Ohmschen Strom zusammensetzt.

Fig. 16.



Gen.-Sp. 1, 2‴, 3, 4‴, 5.
Zellen-Sp. 1, 2′, 3, 4″, 5.
Ohmscher Strom 1, 2″, 3, 4′, 5.
Ladestrom 1, 2, 3, 3′, 4, 5′, 5.
Strom 1, 2″, 3, 3′, 4′, 5′, 5.

Hieraus ergäbe sich sofort, daß der Wirkungsgrad kleiner Elektroden besser wäre, wie der großer, weil ihre Kapazität kleiner, ihr Ohmscher Widerstand größer ist (c. p.) in der Richtung Al — Pb, wenn nicht der Widerstand in der Richtung Pb — Al[1]) eine große Rolle spielte, so daß in Wirklichkeit, wie wir sehen werden, kleine Elektroden schlecht brauchbar sind.

---

[1]) Und die Erwärmung.

c) Tabelle der vorliegenden Kurven und augenfällige Schlüsse aus der Kurvenform (s. graphische Darstellungen IX bis XXII.

Im folgenden werden nun zunächst einige Schlüsse angeführt, die man schon bei Betrachtung der aufgenommenen Kurven aus ihrer Form und den Versuchsbedingungen ziehen kann. Aus meinem Versuchsmaterial teile ich hier folgende Reihen mit, wozu ich bemerken möchte, daß die Ergebnisse der Versuche später noch ausführlicher besprochen werden.

Versuchs-Nr.	Elektrolyt	Dimens. der Al-Elektr.	Fläche (einseit.)	Gen.-Sp. E_g (ca.)	Wechselzahl	Belastung (Konsumwiderstand)	Ergebnis des Versuches
3a	$NaHCO_3$,	Φ 6 mm,	680	18½	100	6,871 Ω bif.	1. Schlechte Wirkung zu kleiner Aluminiumflächen, 2. Schlechte Wirkung niederer, bessere Wirkung höherer Spannung, 3. Schlechte Wirkung hoher Belastungswiderstände (d. h. kleiner Ströme), 4. Resonanz bei induktiver Belastung
3b	6 %ig	36 mm tief	qmm			2,57 Ω bif. 4,606 Ω indukt. (97,5 Millihenry) 33,57 $Ω_s$[1])	
3c						0,981 Ω bif. Indukt.W. wie 3b 31,98 $Ω_s$	
3d				37			
3e					50	Wid. wie 3c u. 3d. 16,88 $Ω_s$	
4a	7 %ig	Φ 5 mm, 36 mm tief	570	60	100	8,09 Ω bif.	1. Schlechte Wirkung kleiner Al-Fläche trotz nicht zu niederer Spannung, 2. Einfluß der Instrumente der Wellenstromschaltung (Aufnahme mit und ohne), 3. Vergrößerung des Widerstands in beiden Richtungen beim Zusammenschmelzen des Al
4b		Φ kleiner werdend					
5a	6 %ig	Platte 137 mm tief, 98 mm breit	13400	30	100		1. Gute Wirkung großer Flächen trotz niederer Spannung, 2. Gute Wirkung der Spannungserhöhung
5b				45			

[1]) $Ω_s$ = scheinbarer Widerstand.

Versuchs-Nr.	Elektrolyt	Dimens. der Al-Elektr.	Fläche (einseit.)	Gen.-Sp. E_g (ca.)	Wechselzahl	Belastung (Konsumwiderstand	Ergebnis des Versuches
6	wie 3a	Φ 8 mm, 90 mm tief	2270	60	50	wie 4a	Schlechte Wirkung der Temperaturerhöhung
7		Φ 8,5 mm, 115 bis 120 mm tief	3140		100		1. Gute Wirkung großer Flächen bei mittlerer Spannung, 2. Wellen der Kurven, die schon in den Generator-Leerlauf-Spannungskurven auftreten, rühren von der Maschine her, nicht von der Zelle (s. graph. Darstellung), 3. Einfluß der Wellenstromschaltungsinstrumente (wie 4)
8a					50		Gute Wirkung höherer Spannung so bedeutend, daß der negative Strom (Al-Pb) nicht nur nicht größer, sondern zum Teil sogar kleiner wird
8b				75			
8c				45			
9a	wie 5a	wie 5a	13400	60			Desgleichen mit noch größerer Fläche (Blech)
9b				75			

Die Möglichkeit des Vergleichs dieser einzelnen Versuche wird beeinträchtigt durch folgende Umstände:

1. Verschiedenheit des Aluminiummaterials [1]),
2. Verschiedenheit der Formierung,
3. Einwirkung der Temperatur.

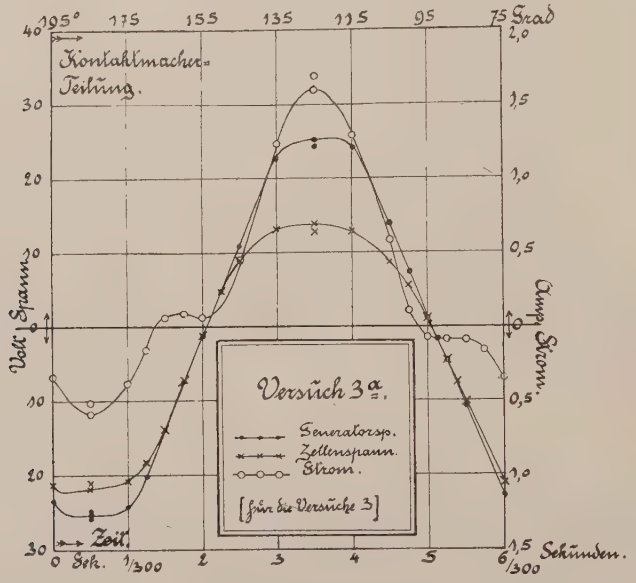
Infolgedessen lege ich stets den Hauptwert auf den Vergleich von Kurven einer und derselben Versuchsreihe (mit der gleichen Ordnungsnummer bezeichnet):

Reihe 3 und 4 wurden mit kleiner Aluminiumelektrode ausgeführt; nachdem diese bei der ganz geringen Belastung der Versuche 3 in 1- bis 2-wöchigem Betrieb $^1/_6$ ihres Durchmessers eingebüßt hatte, wurde sie bei der stärkeren Beanspruchung der Reihe 4 in wenigen Tagen bis auf eine konische Spitze von ca. $^1/_3$ bis $^1/_2$ ihrer ursprüng-

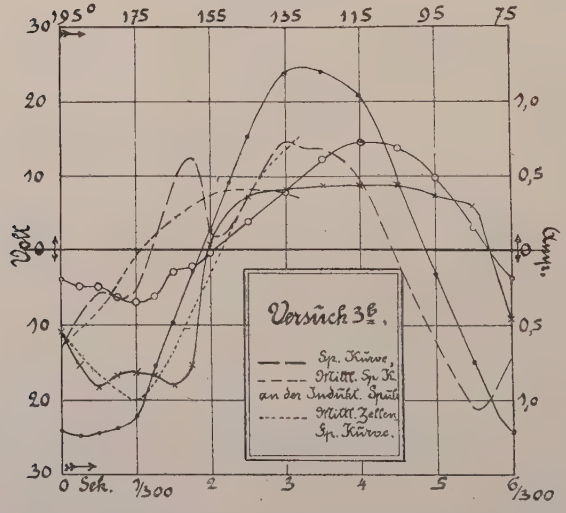
[1]) Es wurde bei diesen Versuchen allerdings mit Neuhausener Aluminium von möglichst derselben Lieferung gearbeitet (doch s. S. 2 und 3); die Versuche mit 2 Zellen und 4 Zellen wurden mit garantiert 99,5 % Al-haltigem reinsten Aluminium ausgeführt. Der in den Versuchen 3 und 4 verwendete Stift war ziemlich eisenhaltig, was wohl außer der Kleinheit der Fläche zu der schlechten Wirkung in den genannten Versuchen beigetragen haben mag; indes ergaben andere weniger eisenhaltige Stifte Kurven von derselben Größenordnung.

lichen Länge aufgebraucht; dies bot Gelegenheit, die Wirkung der Verkleinerung von Elektroden im Betrieb zu studieren (s. graphische

Graphische Darstellung IX.

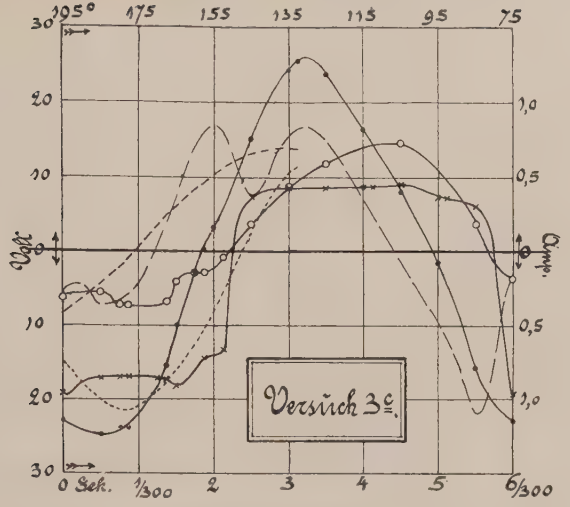


Graphische Darstellung X.

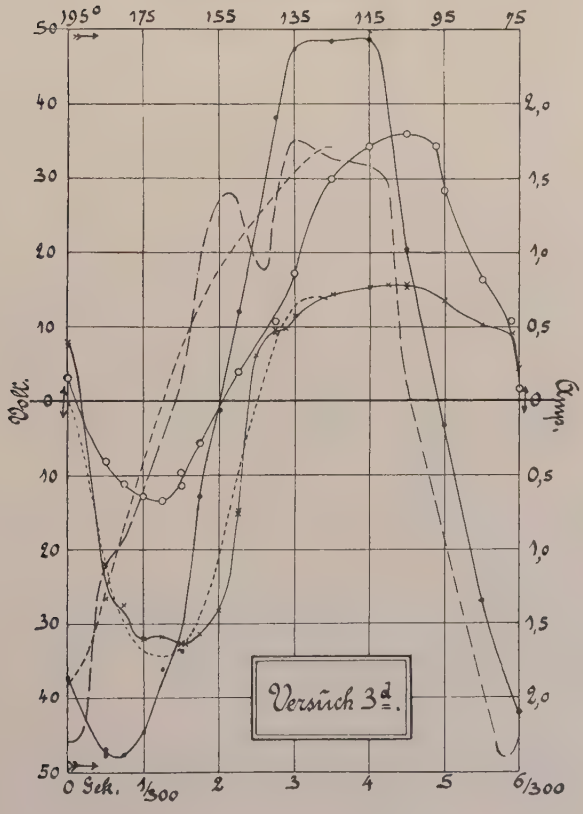


Darstellungen XV bis XVII). Man erkennt, daß dabei der Widerstand in beiden Stromrichtungen größer wurde, so daß (wie wir auch bei

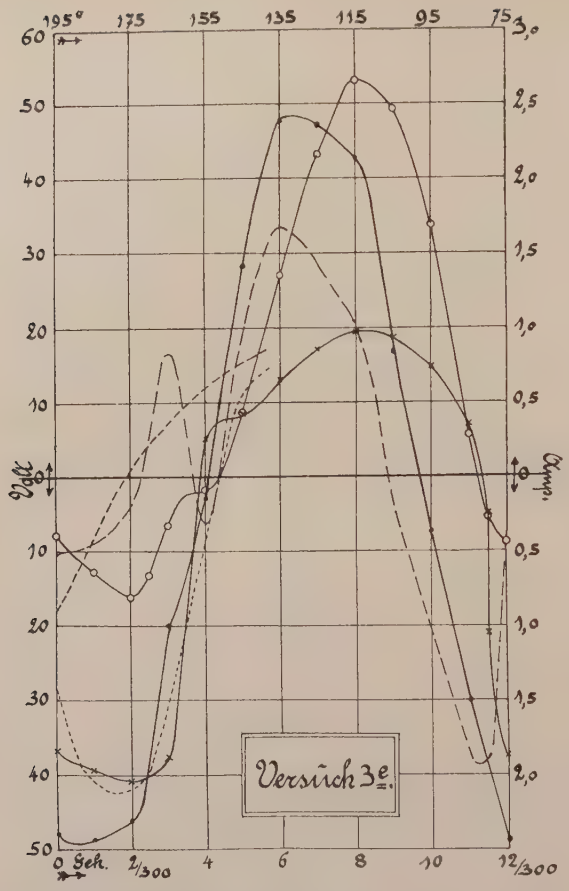
Graphische Darstellung XI.



Graphische Darstellung XII.



Graphische Darstellung XIII.



der rechnerischen Behandlung dieser Kurven sehen werden) zu starke Verkleinerung der wirksamen Aluminiumflächen im Starkstrombetrieb unzweckmäßig erscheint.

Einen ersten Anhaltspunkt für die Vergleichung der Stromdurchlässigkeit nach beiden Richtungen geben die Momentanwiderstände in den positiven und negativen Maximalpunkten der Kurven [1]). Hier ging nun der Widerstand in negativer Richtung von 22 Ω (bei Versuch 4a) auf 46 Ω (bei 4b) hinauf, in positiver Richtung von 4,25 Ω auf 8,96 Ω. Bemerkenswert ist hier auch die absolute Größe der Widerstände in positiver Richtung.

---

[1]) Ich bezeichne stets die Richtung Pb—Al als positive, die Richtung Al—Pb als negative Stromrichtung.

Schließlich wurde das Aluminium noch gar bis auf einen kleinen Rest (nadelfeine Spitze) unter den folgenden Erscheinungen zusammengeschmolzen, die sich vollkommen mit den im Gleichstrombetrieb beobachteten Wehnelterscheinungen decken:

Effektive Generatorspannung	Erscheinung
70 Volt	Lebhaftes Glühen und Leuchten der Aluminiumelektrode noch oberhalb der Flüssigkeitsoberfläche. Aufsteigen von Dampf.
80 „	Beginn des Glühens im Innern der Flüssigkeit.
90 „	Beginn des Glühens der Spitze des Aluminiums.
100 „	Hauptsächlich die Spitze in Glut; helles Licht. Lebhaft knatterndes Unterbrechergeräusch.
110 „	Glühen der ganzen Elektrode. Beim Herausziehen Lichtbogen zwischen Aluminium und Flüssigkeit.

Ich gehe nun zu einigen anderen Ergebnissen dieser Versuche über: Es zeigt sich, daß im allgemeinen mit steigender Generatorspannung der Widerstand Pb — Al sich verringert, während der Widerstand Al — Pb sich nicht viel ändert, z. B.:

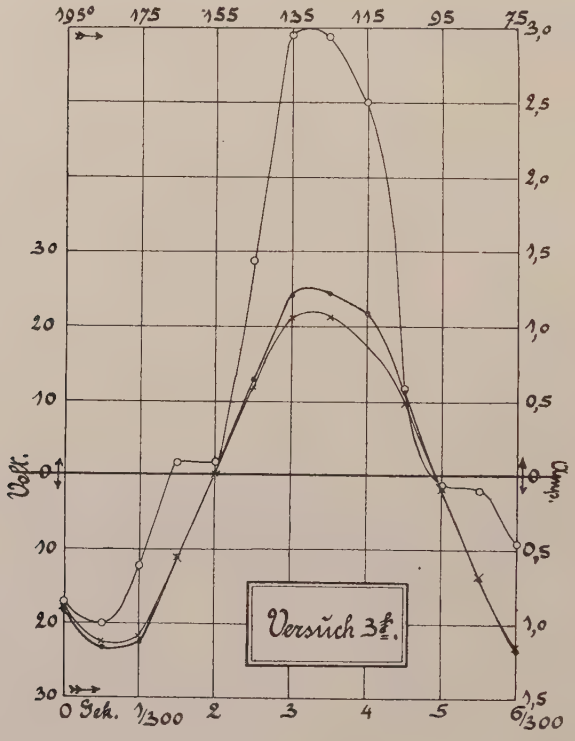
Versuchsreihe	Spannung $\tilde{E}_g$	Momentanwiderstand an den Maximalpunkten	
		Pb—Al	Al—Pb
3 c	ca. 18½ Volt	12,5 Ohm	46 Ohm
3 d	„ 37 „	8,73 „	47 „
5 a	„ 30 „	6,93 „	87,3 „
5 b	„ 45 „	5,49 „	89 „
8 a	„ 60 „	2,04 „	57,3 „
8 b	„ 75 „	1,79 „	56,3 „

Ich führe das darauf zurück, daß bei größerer Spannung in derselben Zeit leichter die Formierung wieder zerstört wird, als bei kleinerer. Die hohen Widerstände Pb — Al [1]) können ja nur von noch

[1]) Numerisch stets größer als vor der ersten Formierung der betreffenden Zelle.

nicht zerstörter Formierung herrühren. Andererseits geht Erhöhung der Spannung mit Temperaturerhöhung (infolge des stärkeren Pb—Al-Stromes) Hand in Hand; Temperaturerhöhung verringert aber den Widerstand Al—Pb, so daß dieser sich wenig ändert, sich vergrößert, wenn die bessere Formierungswirkung höherer Spannung überwiegt, verringert, wenn die Formierung zerstörende Temperaturwirkung über-

Graphische Darstellung XIV.

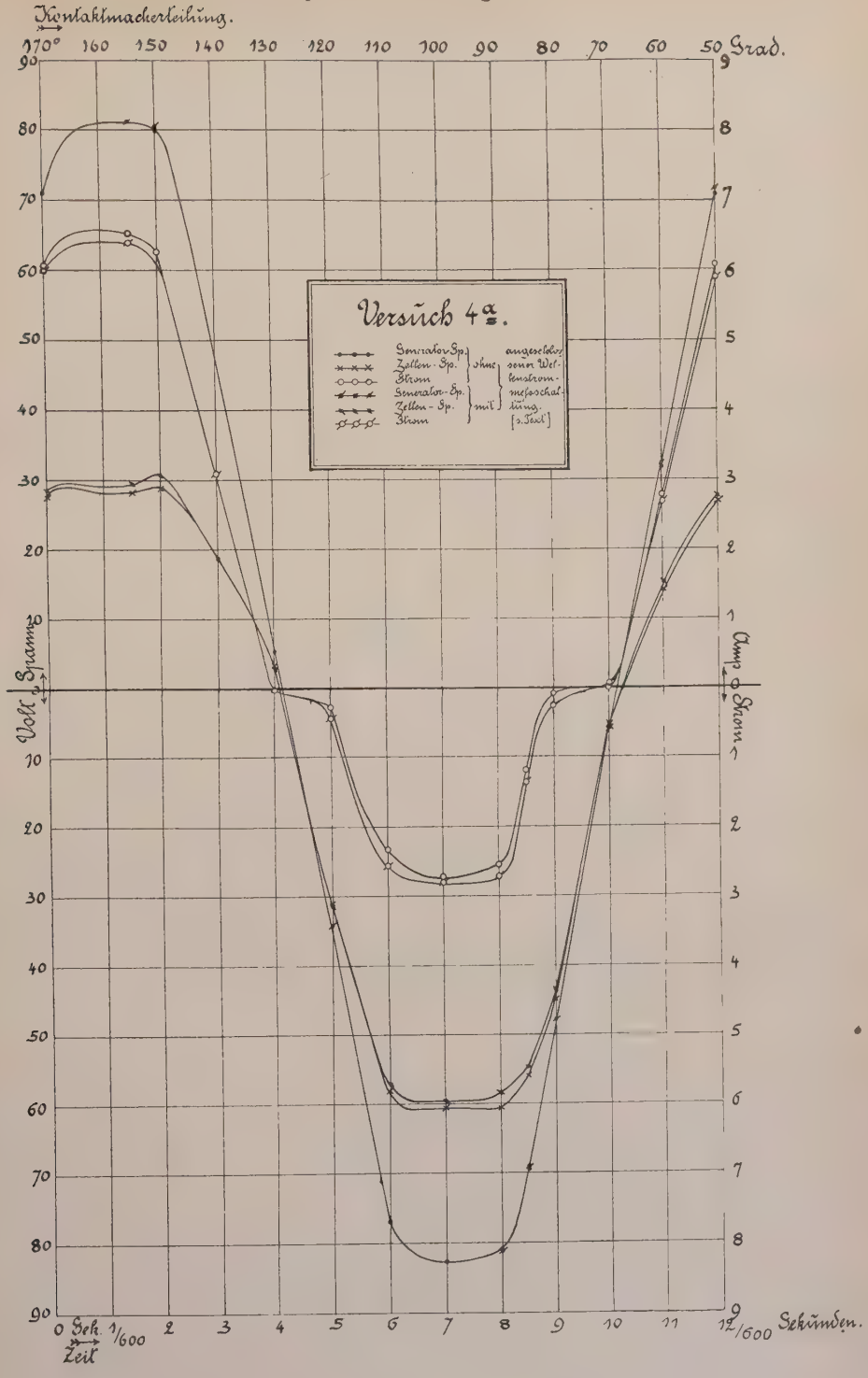


wiegt. Die Temperaturwirkung verringert daher auch den Widerstand Pb—Al.

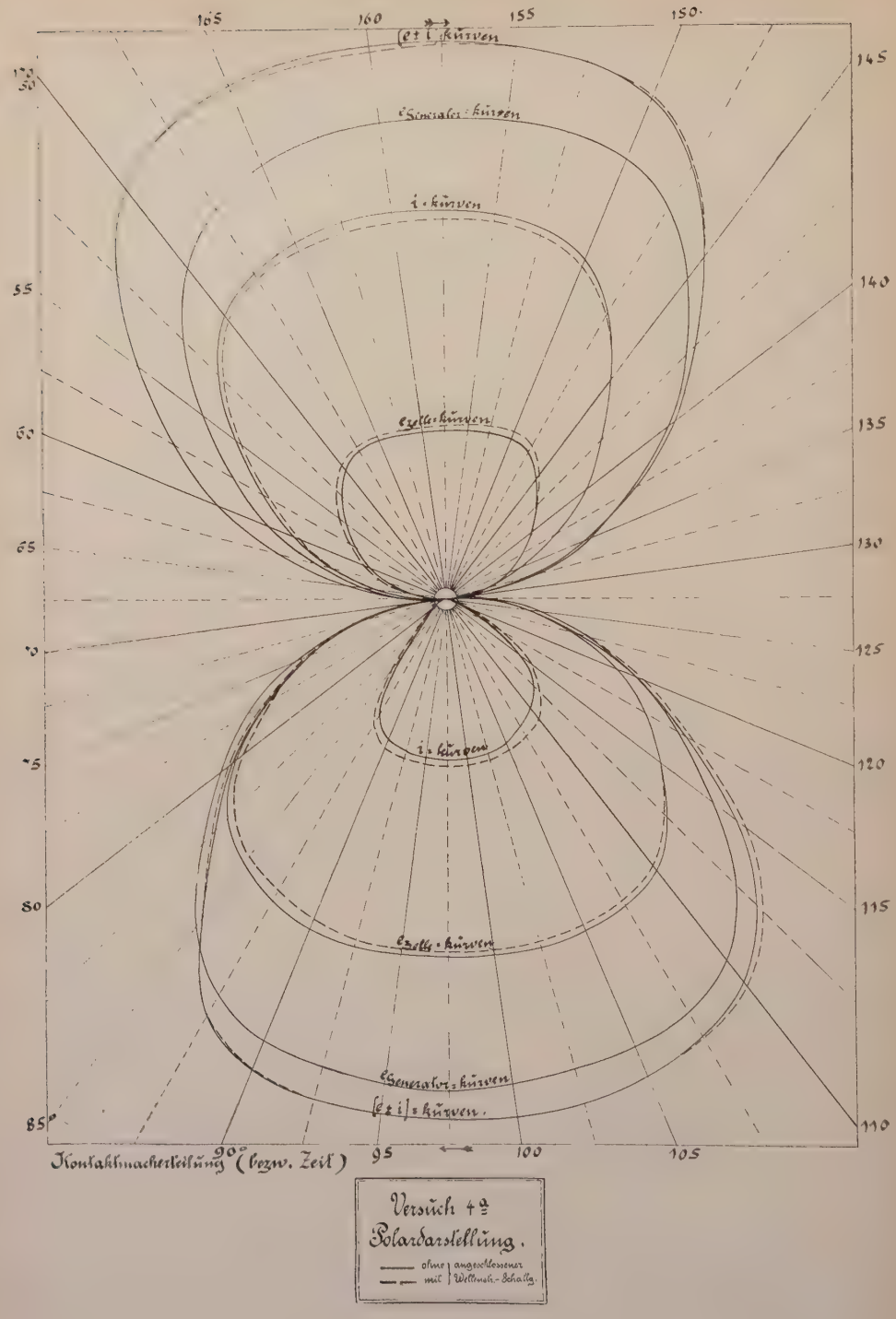
Z. B. Versuch Nr. 6.

Temperatur		21°,C.	32°	33°	40°	45 1/2°	48°
150°	der Kontakt-macher-teilung	—	3,89 Ohm	3,7	3,35	3,18	3,02
100°		62,3 Ohm	53,8 „	42,5	33,6	28	23,4

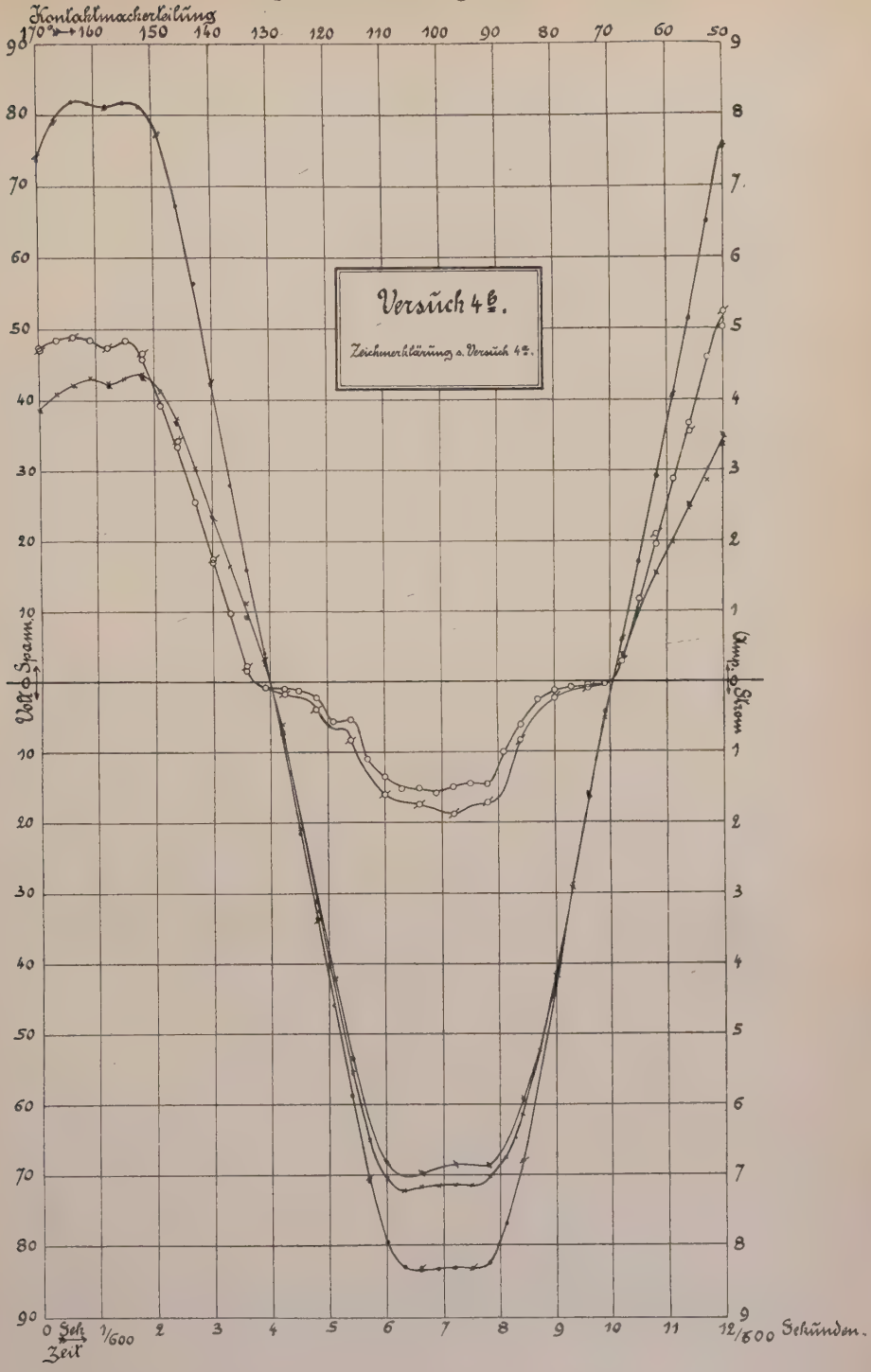
Graphische Darstellung XV.



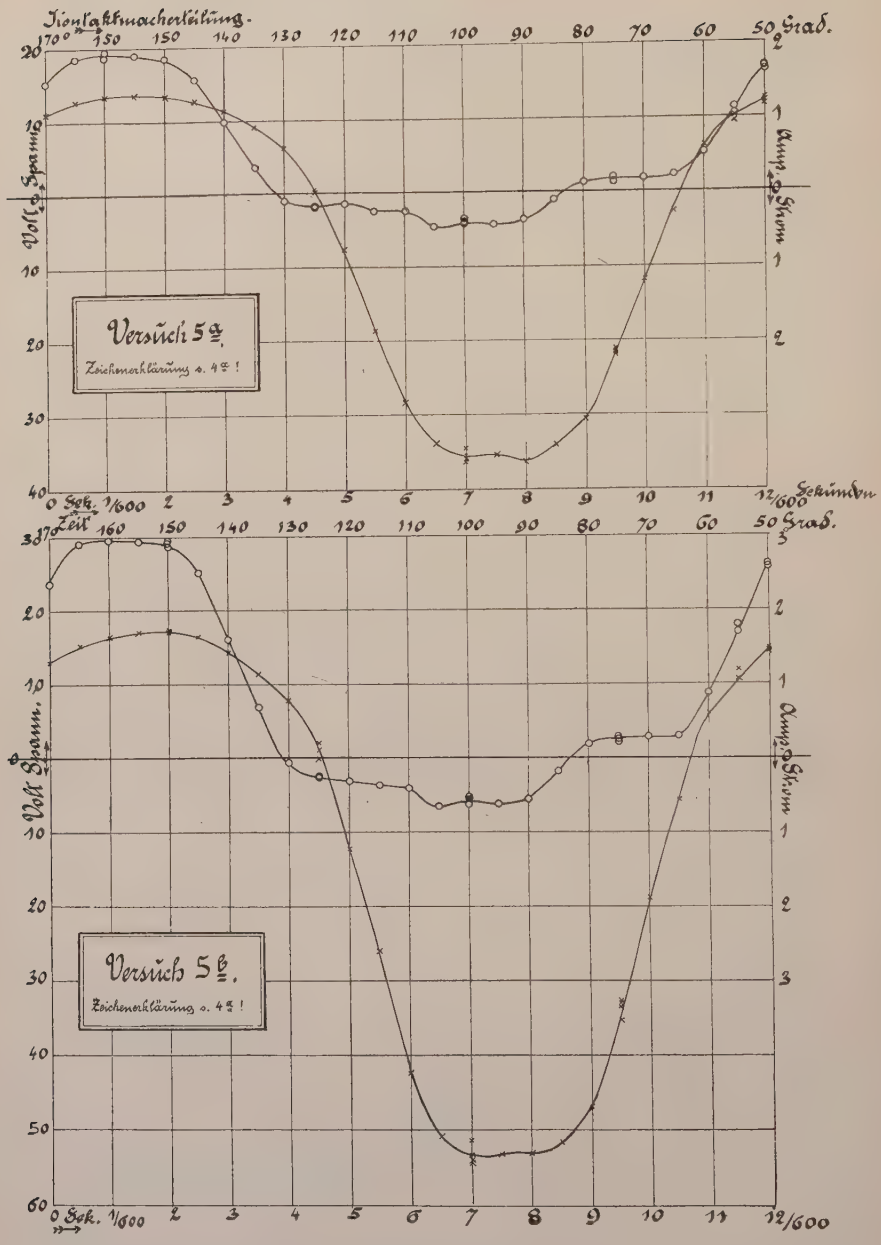
Graphische Darstellung XVI.



Graphische Darstellung XVII.

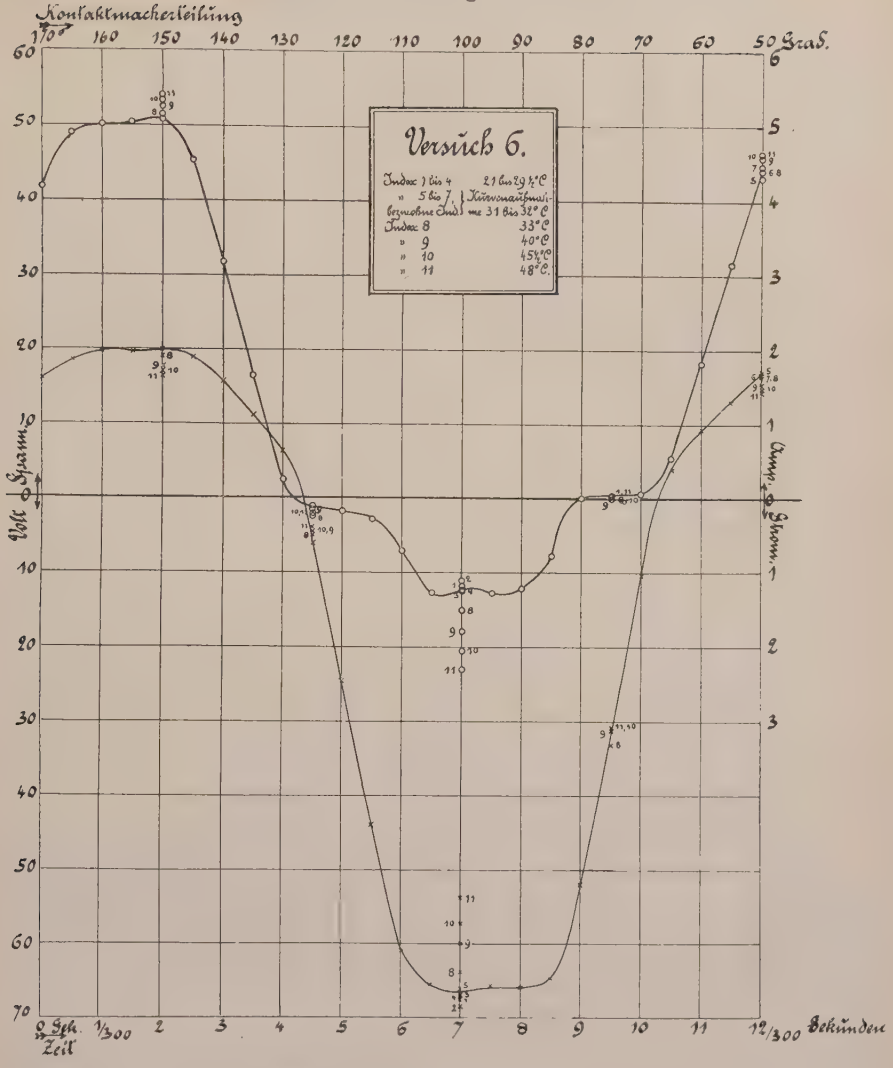


Graphische Darstellung XVIII.



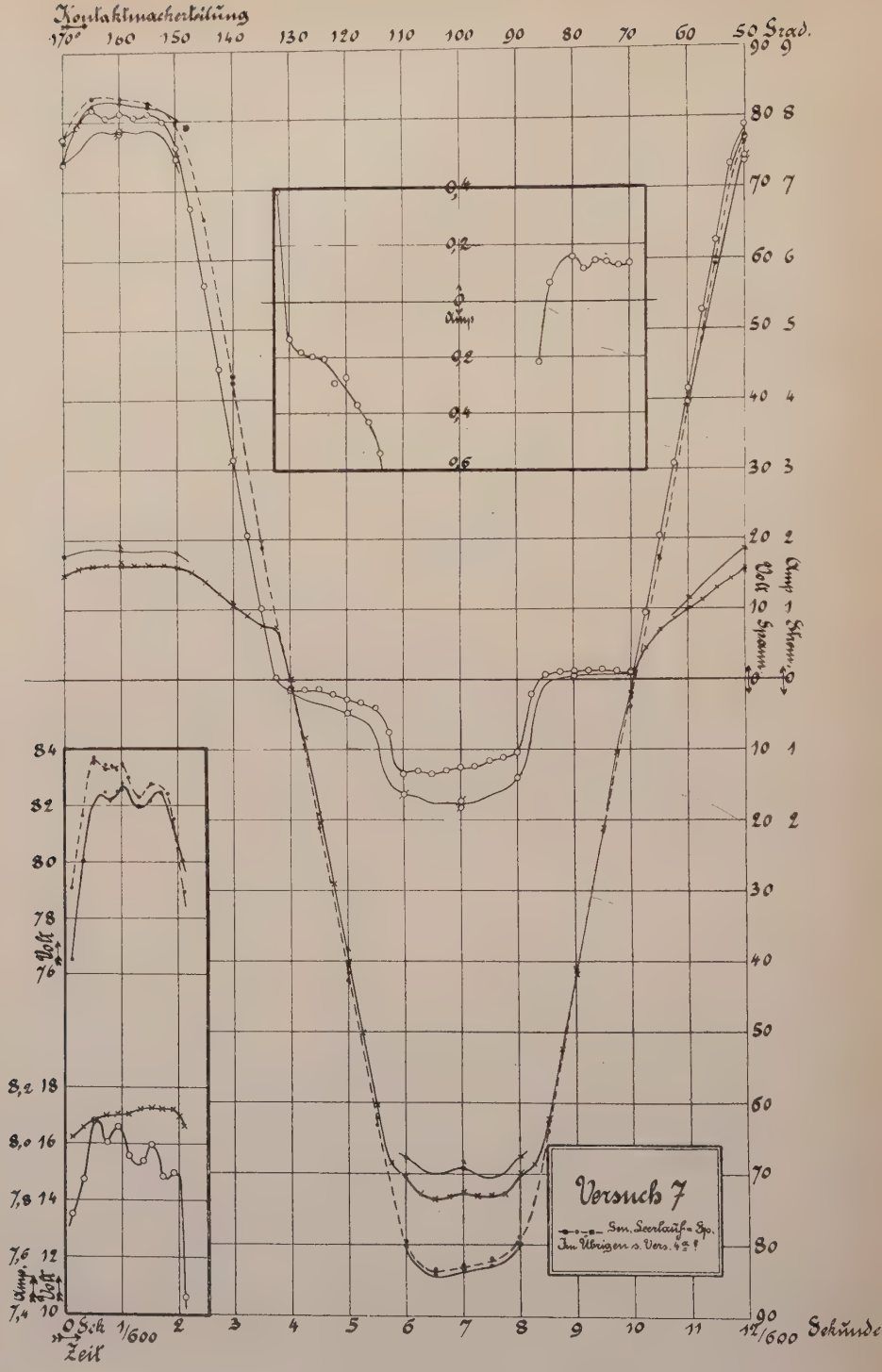
Erhöhung der Wechselzahl verkürzt die Dauer der Formierungszeit, verringert also den Widerstand Al—Pb. Z. B.

Graphische Darstellung XIX.

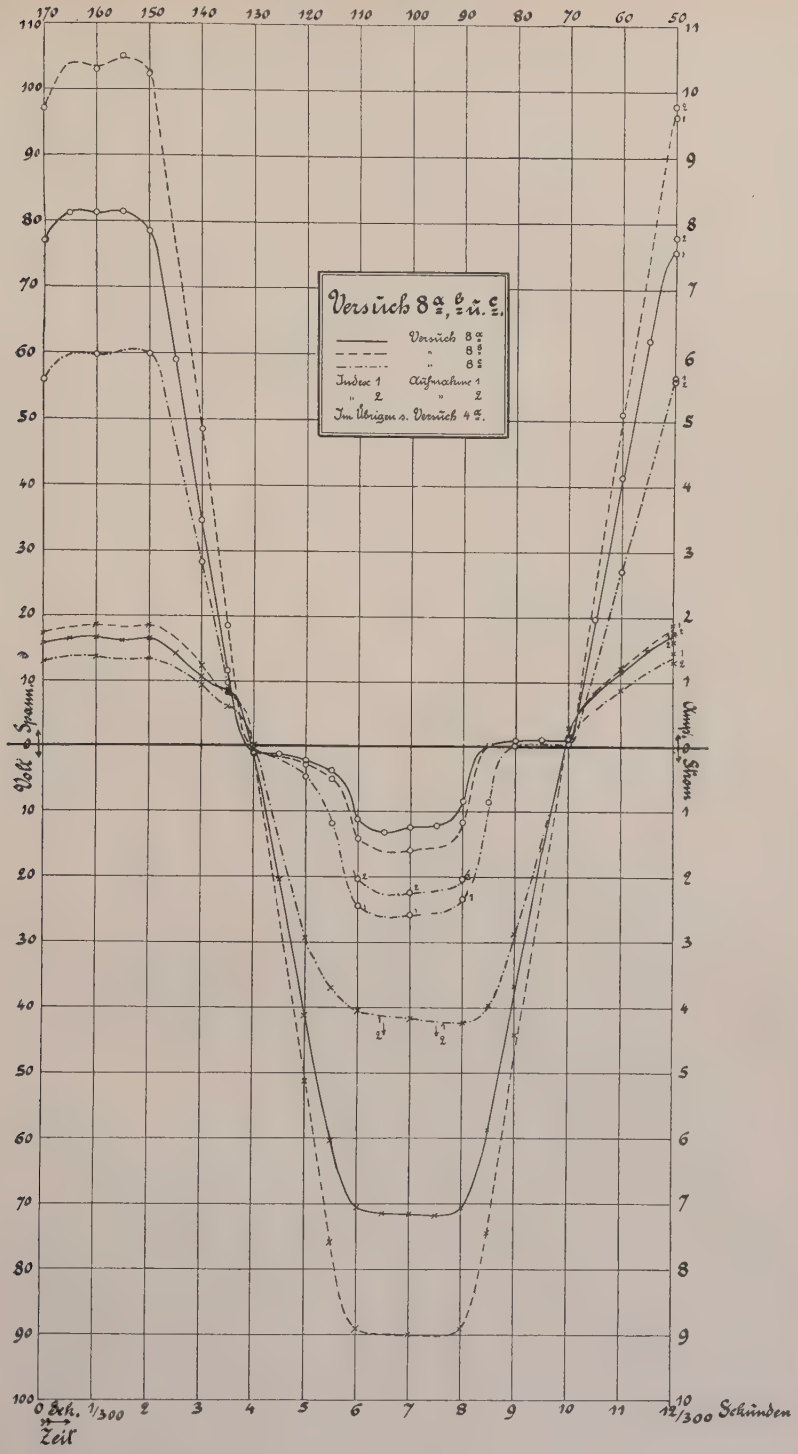


Versuchsreihe Nr.	Wechselzahl	Widerstand in den Maximalpunkten	
		Pb—Al	Al—Pb
7	100	2 Ohm	46,7 Ohm
8	50	2,04 „	57,3 „

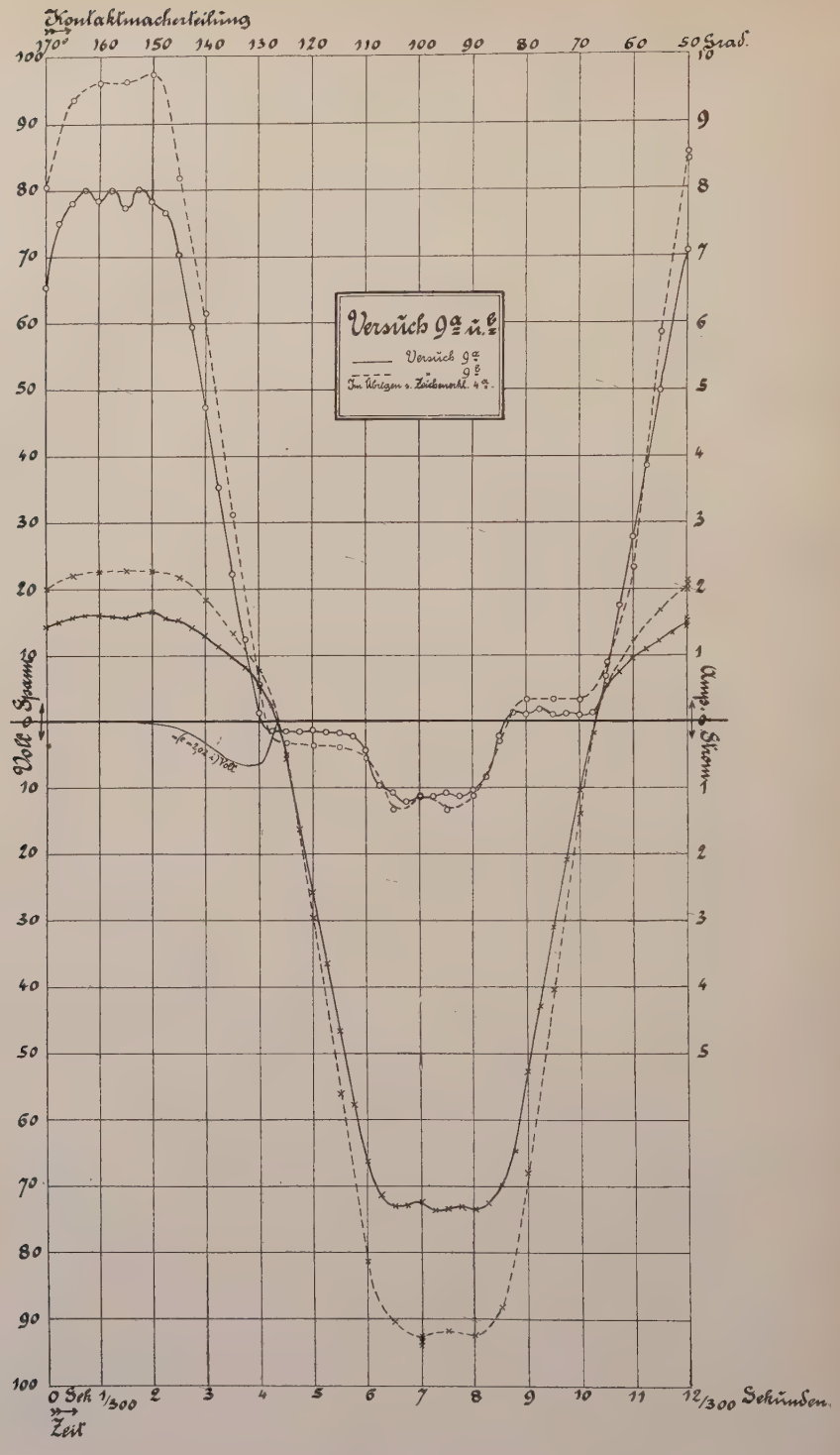
Graphische Darstellung XX.



Graphische Darstellung XXI.



Graphische Darstellung XXII.



Hier wird trotz größerer Formierung der Widerstand Pb—Al doch auf denselben Wert (bei Reihe 8) heruntergebracht, eben wegen der längeren Entformierungszeit.

Eine Kombination der Wirkung höherer Spannung mit der niederer Wechselzahl geben die Versuche 3d und 3e; die Spannungsvariation erfolgt hier durch Veränderung des scheinbaren Konsumwiderstandes Ω_s.

Versuchsreihe Nr.	Generatorspannung $\tilde{E}_g$	Wechselzahl	Konsumwiderstand Ω_s	Widerstand in den Maximalpunkten	
				Pb—Al	Al—Pb
3d	ca. 37	100	31,98	8,73 Ohm	47 Ohm
3e	ca. 37	50	16,88 [1])	7,24 „	51,2 „

Im ganzen haben wir also folgendes Resultat: Am günstigsten ist es, mit nicht zu kleiner Fläche, hoher Spannung (d. h. großem Formierungsstrom), kleiner Wechselzahl, niederer Temperatur zu arbeiten.

Es erübrigt, über zwei interessante, in diesen Versuchen enthaltene Beobachtungen zu sprechen, über die Wirkung induktiver Belastung und die der Wellenstromschaltung auf die Kurvenform (Versuch Nr. 3, bezw. 4 und 7).

Wirkung induktiver Belastung:

Bei den Versuchen 3b, c, d, e haben wir einen bemerkenswerten Fall von Spannungsresonanz mit abklingenden Schwingungen (einseitiges Verhalten) vor uns. Bei induktiver Belastung fällt in unseren Kurven die Zellenspannung ganz steil ab und steigt ganz steil an. Beim Ansteigen der Generatorspannung vom Negativen ins Positive konzentriert sich die Spannung zunächst an der Induktionsspule, die einer Richtungsänderung des Stromes großen Widerstand entgegensetzt, während die Zelle eine Stromverringerung in Richtung Al—Pb leicht zuläßt; infolgedessen bleibt die Zellenspannung zunächst auf ihrem negativen Maximalwert. Erst wenn der Strom ins Positive überschlägt und daher nach dem Ausgleichsgesetz eine gewisse positive Zellenspannung sich einstellen muß, steigt die Spannung aus dem Negativen ins Positive und zwar so rasch, daß sie ihre Spannung dem Spannungsakkumulator (wie man die Induktionsspule nennen könnte)

[1]) Also höhere Spannung am Elektrolyten.

entnimmt. Es tritt genau nach den Regeln der Spannungsresonanz ein Pulsieren der Spannungen an Zelle (Kapazität) und Spule (Selbstinduktion) auf, das sich in den Kurven als Spannungswelle ausdrückt. Beim Absteigen der Spannung ins Negative klingt die Welle ab, da jetzt Zelle und Selbstinduktion Spannung aufzunehmen im stande sind. Kompliziert wird die Schwingung durch die Variabilität von Ohmschem Widerstand und Kapazität (die man in der Regel bei Schwingungen nicht hat); zugleich wird aber dadurch ihr Auftreten erleichtert, indem sich die Resonanzgleichung selbsttätig einstellt (Elastizität der einzelnen Größen derselben [1]).

Ich habe für die 4 Versuche die an der Induktionsspule bestehende Spannungskurve berechnet und in die graphische Darstellung mit aufgenommen (s. Kurven zu den Versuchen 3). Es konnte nun in dem negativen Teil (da wo Spannungsresonanz auftritt) eine mittlere Kurve der Zellenspannungen und Spulenspannungen freihändig eingetragen werden. Man erkennt sofort die gegensätzlichen Wellen, die über diesen gestrichelten mittleren Kurven als Niveaus schwingen. Zugleich wird das fast horizontale Stück der Stromkurve bei den Uebergängen von der einen in die andere Richtung, das wir der kapazitiven Wirkung zuschreiben konnten [2]), in seinem Charakter verändert (d. h. durch die Induktion wird diese kapazitive Wirkung aufgehoben oder verringert). Strom- und Spannungskurve gehen jetzt zugleich durch Null, während bei induktionsfreier Belastung der Strom zuerst durch Null ging. Weitere Versuche mit induktiver Belastung wurden nicht angestellt.

Wirkung der Wellenstromschaltung auf die Form der Kurve:

Aus den Versuchsreihen 4 und 7 ist ersichtlich, wie sich die Kurven ändern, wenn man die sogenannte Wellenstromschaltung anschaltet. Auch dieser Einfluß ist von anderer Natur wie bei Untersuchungen von symmetrischem Wechselstrom; es ist z. B. der Widerstand von Voltmetern groß gegen den Widerstand Pb — Al, aber nicht groß gegenüber dem Widerstand Al — Pb. Aus den betreffenden Kurven ist ersichtlich:

1. Strom Al — Pb wird größer, weil der Stromverbrauch der Spannungsspulen ins Gewicht fällt, und zwar umsomehr, je größer der Elektrolytwiderstand ist (bei Versuch 7 am meisten, bei 4a am wenigsten).

---

[1]) Siehe auch Heinke, Ann. d. Phys., 4. Folge, Bd. 1, 1900, S. 333.

[2]) Siehe S. 35, Fig. 16.

2. Strom Pb — Al wird kleiner, weil der Widerstand der Amperemeter und der Wattmeterhauptspule ins Gewicht fällt, und zwar umsomehr, je kleiner der Elektrolyt- und Belastungswiderstand ist (am meisten bei 7, am wenigsten bei 4b).

3. Spannung Al — Pb wird kleiner, da der Widerstand durch die Spannungsspulen verkleinert wird, und zwar umsomehr, je größer er ursprünglich war (bei Versuch 7 am meisten, bei 4a am wenigsten).

4. Spannung Pb — Al wird größer, da sich am Konsumwiderstand infolge des kleineren Stromes eine kleinere Spannung einstellt, die Generatorspannung aber gleich bleibt (Einregulierung), so daß sich an der Zelle größere Spannung einstellt (bei Versuch 7 am meisten, bei 4b am wenigsten).

Im ganzen verschieben sich also Strom- und Spannungskurve in Richtung der Ordinatenachse im Sinne ungünstigerer Wirkung.

b) Kurvenanalyse.

Nachdem wir nun nach dem Augenschein zunächst einige Schlüsse aus der Kurvenform gezogen haben, unterwerfen wir im folgenden eine typische Kurve (Versuch 9a) einer genauen Analyse, aus der hervorgeht, wie sich eigentlich der Vorgang in der Zelle von Moment zu Moment abspielt. Zu diesem Zweck wurde die Kurvendarstellung von Versuch 9a (s. graphische Darstellung XXII) in ganz großem Maßstab herausgezeichnet, Spannungs- und Stromkurve darin interpoliert, so daß die zufälligen (im Generator u. dergl. begründeten) kleinen Wellen herausfielen, und diese neue Darstellung der Analyse zu Grunde gelegt. Ich bespreche den Gang und die Resultate der Analyse an Hand der graphischen Darstellung XXII und der Zahlentafel S. 54 und 55.

Die Spannungskurve wird durch die Abszissenachse in einen positiven Ast von 66,9 ° [1]) bis 126,6 ° mit dem Maximum von 16,11 Volt bei 150 ° und in einen negativen Ast von 126,6 ° bis 66,9 ° mit dem Maximum von — 73,42 Volt bei 90 ° geteilt.

Die Stromkurve läßt sich ganz zwanglos in 4 charakteristische Teile zerlegen:

Teil I: Positive Stromwelle von ca. 68 ° über 160 ° (Maxim. Punkt) bis ca. 128 °

+ 0,13 Amp. + 7,93 — 0,14

(also 60 ° = ½ Periode).

---

[1]) der Kontaktmacherteilung. — 120 ° entsprechen einer Periode = 1/25 Sek. — Die Zeitzählung versteht sich von links nach rechts, von 170 ° bis 50 ° der Kontaktmacherteilung.

Grad der Kontaktmacherteilung	e Volt	i Amp.	$\frac{e}{i}$ Ohm	-(e-2,02i) Volt Polarisationsspannung	$C = \frac{i}{\frac{de}{dt}}$ Mfd.	c Mfd.	r Ohm
170	14,40	6,99	2,06				
167	15,32	7,54	2,03	—			
165	15,70	7,78	2,02	0			
162	15,99	7,91	2,02	0			
160	16,00	7,93	2,02	0			
158	16,00	7,90	2,02	0			
155	16,01	7,88	2,035	— 0,1			
150	16,11	7,88	2,05	— 0,2			
148	15,99	7,69	2,08	— 0,48			
145	15,19	7,05	2,15	— 0,96			
140 ½	13,20	4,98	2,65	— 3,14			
140	12,90	4,73	2,73	— 3,34			
135	9,78	2,28	4,29	— 5,18			
132	7,51	0,97	7,75	— 5,55			
130	5,46	0,13	42,0	— 5,20			
129,6	5,00	±0	±∞	— 5,00	—	—	—
129	4,13	— 0,10	— 413	— 4,33	—	—	—
128	2,6	— 0,14	— 18,58	— 2,88	30	29	ca. 60
127	0,79	— 0,144	— 5,49	— 1,08	—	—	—
126,6	0	— 0,15	∓0	— 0,3	—	18	—
126 ½	—	—	—	0	—	17 ½	—
126	— 1,7	— 0,15	11,34	+ 1,4	—	16	—
125	—	—	—	—	12	14	ca. 110
124	— 10	— 0,158	63,3	—	12	13	„ 250
123	—	—	—	—	13	12 ½	„ 500
122	— 18,2	— 0,161	113	—	—	12	< 500
121	—	—	—	—	—	11 ½	ca. 400
120	— 26,1	— 0,17	153,45	—	15	11	„ 250
118	— 34,3	— 0,179	191,55		15	9 ½	ca. 125
116	— 42,78	— 0,182	235,1		—	6 ½	„ 80
115	— 46,9	— 0,195	240		15	5	„ 60
114 ½	— 49,2	— 0,20	246		—	—	—
114	— 51,35	— 0,201	255		—	2	„ 40
113 ½	— 53,5	— 0,21	255		20	0	—
113	— 55,7	— 0,224	248		—	—	—
110	— 66,5	— 0,44	151		—	—	—

Grad der Kontaktmachertei ung	e Volt	i Amp.	$\frac{e}{i}$ Ohm	-(e-2,02i) Volt Polarisationsspannung	$C = \frac{i}{\frac{de}{dt}}$ Mfd.	c Mfd.	r Ohm
107	— 71,82	— 1,008	71,3				
105	— 72,7	— 1,105	65,9				
103	— 72,75	— 1,155	63,0				
102	— 72,8	— 1,16	62,7				
101	— 72,8	— 1,16	62,7				
100	— 72,9	— 1,15	63,5				
98	— 73,0	— 1,117	65,4				
95	— 73,19	— 1,11	66,0				
93	— 73,33	— 1,098	66,8				
90	— 73,42	— 1,02	71,6				
88	— 73,07	— 0,861	84,85		—	225	—
85	— 69,9	— 0,22	318		—	160	—
84	— 68,2	∓ 0	± ∞		—	90	—
82	— 62,75	+ 0,122	— 514,5		12 1/2	—	—
80	—	—	—		11	13 1/2	ca. 40
79	— 48,61	0,142	— 342,2		—	10	—
78	—	—	—		—	8	ca. 80
77	—	—	—		10	5 1/2	—
75	— 31,15	0,12	— 259,5		9 1/2	3	„ 290
73	—	—	—		—	2	—
72	—	—	—		9	3 1/2	—
70	— 10,75	0,098	— 109,7		9 1/2	11	„ 670
68	— 3,54	0,13	— 27,22		13 1/2	18	ca. 7300
67	— 0,3	0,20	— 1,5		—	17	—
66,9	∓ 0	0,21	∓ 0		26,4	17	—
66	2,4	0,34	7,06		—	4	—
65 3/4	—	—	—		—	0	—
65	4,4	0,655	6,73		—	—	—
60	9,3	2,78	3,35		—	—	—
55	12,28	4,98	2,46				

Teil II: Negativer kleiner konstanter Strom von ca. 128° bis ca. 113°
— 0,14 Amp. — 0,25
(also 15° = 1/8 Periode).

Teil III: Negative Stromwelle von ca. 113° über 102° (Maxim. Punkt) bis ca. 83°
— 0,25 Amp. — 1,16 + 0,10
(also 30° = 1/4 Periode).

Teil IV: Positiver kleiner konstanter Strom von ca. 83 ° bis ca. 68 °
+ 0,10 Amp. + 0,13

(also 15 ° = 1/8 Periode).

Diese charakteristischen Teile kehren bei induktionsfreier Belastung bei allen Kurvenaufnahmen wieder, wenn sie auch etwa nicht ganz genau denselben Prozentsatz der Periode wie hier ausmachen.

Die Zahlentafel S. 54 und 55 enthält in ihren 3 ersten Rubriken die Grade der Kontaktmacherteilung und die dazu gehörigen den interpolierten Kurven entnommenen Momentanwerte e und i.

Ich mache nun zunächst die einfachste mögliche Annahme, nämlich daß sich die Zelle durchaus wie ein variabler Ohmscher Widerstand verhalte. In der 4. Rubrik der Zahlentafel sind die Momentanwerte des Ohmschen Widerstandes $\frac{e}{i}$ zusammengestellt. Wir werden sehen, daß diese Widerstände zumeist nur als „scheinbare Ohmsche Widerstände" (resultierende Momentanwiderstände) aufzufassen sind.

I. Betrachten wir zunächst die Werte der positiven Stromwelle (Strombereich I (s. S. 53) und zwar zuerst den absteigenden Ast bei ca. 160 ° beginnend. Hier ist der Widerstand $\frac{e}{i} = 2{,}02$ Ohm und nimmt beständig zu. Es liegt nahe, diese Vergrößerung einer Polarisation zuzuschreiben; die Zelle verhält sich in diesem Bereich eben wie eine gewöhnliche Elektrolytzelle. Nimmt man den Minimalwert 2,02 Ohm als den wirklichen Widerstand an, so gibt $-(e - 2{,}02 \cdot i)$ in jedem Moment die Polarisationsspannung (Rubrik 5 der Zahlentafel). Im Punkt 129,6 °, wo e = 5,00 Volt, wäre $\frac{e}{i} = \infty$ [1]). Hier ist die Polarisationsspannung gerade = — 5,00 Volt. Ich habe in der graphischen Darstellung XXII die Polarisationsspannung eingezeichnet. Man sieht, daß zunächst, wo idt ein großer Wert ist (bei 160 ° etwa) die Polarisationsspannung schnell zunimmt, dann bei immer kleiner werdendem idt (abfallende Stromkurve) immer langsamer und schließlich einen Maximalwert erreicht (Abhängigkeit der Polarisationsspannung von den durch die Zelle hindurchgegangenen Coulomb). Von 129,6 ° an ist der Strom negativ, trotzdem die Spannung positiv ist; $\frac{e}{i}$ wird also negativ bis 126,6 °. Man kann dies zunächst ebenfalls mit dem

[1]) Daß hier ein scheinbarer Widerstand $= \infty$ auftritt, hat eine Analogie in dem ungeheuer großen scheinbaren Uebergangswiderstand von Dynamobürsten bei sehr kleiner Stromdichte.

Vorhandensein der Polarisationsspannung erklären, die nicht momentan verschwinden kann, sondern (wie die graphische Darstellung zeigt) zwar schnell, aber doch in endlicher Zeit auf Null sinkt (bis $126\frac{1}{2}^0$). Die Polarisationsspannung nimmt langsamer ab als die Klemmenspannung e; die Differenz beider Spannungen ist negativ und treibt den negativen Strom.

In zweiter Linie betrachten wir den ansteigenden positiven Ast der Stromkurve von ca. 66^0 bis 160^0. Er setzt mit einem großen Widerstand $\frac{e}{i}$ ein, da die Zelle noch formiert ist und nun erst die Formierung zerstört werden muß. Dies geht ziemlich schnell von statten, so daß der Widerstand bei steigendem Strom etwas schneller abnimmt, als er bei sinkendem Strom infolge der Polarisation zunimmt.

II. Von $126{,}6^0$ an bleibt der Strom fast konstant, während die Spannung sehr schnell ins Negative wächst. Der Widerstand $\frac{e}{i}$ steigt zunächst fast proportional der Spannung, schließlich immer langsamer auf 255 Ohm an. Dies ließe sich vorerst wohl durch immer besser werdende Formierung erklären. Wir werden indes noch eine andere Erklärung bringen (s. unten).

III. Im Teil III der Stromkurve nimmt der Widerstand zunächst ab, indem mit größer werdender Spannung allmählich ein partieller Durchbruch des Stromes erfolgt, bis auf 62,7 Ohm, dann bei geringer werdender Spannung wieder zu.

IV. Der Strom i geht bei 84^0 durch 0, während die Spannung noch — 68,2 Volt beträgt, und nimmt dann einen positiven konstanten Wert an. $\frac{e}{i}$ wird von 84^0 bis $66{,}9^0$ wieder negativ. Wir können nicht umhin, zur Erklärung dieser Negativität eine kapazitive Wirkung anzunehmen [1]), da eine gewöhnliche Polarisation unmöglich eine Spannung von + 68,2 Volt hervorrufen kann. In erster Annäherung setze ich voraus, daß hier nur Kapazität sei und zwar eine konstante Kapazität C. Aus der Gleichung $i = C\frac{de}{dt}$ läßt sich dann für jeden Moment der Kurve $C = \frac{i}{\frac{de}{dt}}$ berechnen, wenn man nur noch die $\frac{de}{dt}$-Kurve aufzeichnet. In der Rubrik 6 der Zahlentafel S. 54 und 55

[1]) während wir dies im Bereich II einstweilen noch umgehen konnten.

sind die so erhaltenen Werte von C eingetragen. Man sieht, daß C nicht ganz konstant ist, was auch nur eine erste Annahme von uns war. Im Bereich IV schwankt indes dieser Wert C nur zwischen 9 und 13½ Mfd. (Mittelwert ca. 11 Mfd.). Es liegt nun nahe, das Verhalten der Stromkurve im Bereich II ebenfalls mit Zuhilfenahme einer Kapazität zu erklären. Dazu berechtigt zunächst das augenscheinlich analoge Verhalten der Zelle in beiden Bereichen: Im Bereich II ist $\frac{de}{dt}$ negativ und fast vollkommen konstant, i ebenfalls negativ und fast vollkommen konstant

$$\begin{matrix} i = C \frac{de}{dt}. \\ <0 \quad <0 \end{matrix}$$

Im Bereich IV sind $\frac{de}{dt}$ und i positiv und fast vollkommen konstant

$$\begin{matrix} i = C \frac{de}{dt}. \\ >0 \quad >0 \end{matrix}$$

Es ergäbe sich bei II ein C von ca. 14 Mfd. im Mittel. Daß hier die Kapazität größer ist, kommt wohl daher, daß wir es bei II mit der Ladung eines Kondensators zu tun haben, bei IV mit der Entladung.

Zusammenfassend bemerke ich also:

Im Bereich I und III erfolgen die Aenderungen von Strom und Spannung ziemlich proportional (Phasenverschiebung = 0), was auf im allgemeinen rein Ohmsche Widerstandswirkung schließen läßt. Im Bereich II und IV entspricht größter Spannungsänderung eine Stromänderung = 0 und zwar so, daß der Strom der Spannung voreilt, was auf eine Kapazität schließen läßt. Auch die Größenordnung von Strom und errechneter Kapazität stimmt gut. Im Bereich IV sind wir zur Annahme einer Kapazität gezwungen, im Bereich II ist sie zunächst höchstwahrscheinlich. Ein zwingender Beweis dafür scheint mir aber in dem auf S. 51 und 52 besprochenen Verhalten der Zelle bei induktiver Belastung enthalten zu sein. Hier verschwinden die beiden horizontalen Stromteile vollkommen, was nur so erklärt werden kann, daß eine kapazitive Wirkung vorhanden ist, die durch die Induktion aufgehoben wird.

Nachdem wir uns nun im allgemeinen überzeugt haben, daß in den Bereichen II und IV Kapazität vorhanden ist, wollen wir dieses

kapazitive Verhalten noch etwas genauer studieren: Wenn C nicht konstant ist, so lautet das Ausgleichsgesetz $i = c \frac{de}{dt} + e \frac{dc}{dt}$ [1]).

Man kann aber nicht einmal annehmen, daß die Zelle als eine reine veränderliche Kapazität aufzufassen ist; jedenfalls wird noch ein Ohmscher Widerstand damit verbunden sein. Wir kehren zu der Voraussetzung zurück, die wir bei der Gleichstromuntersuchung angenommen haben, daß die Zelle wie ein variabler Widerstand r und eine dazu # geschaltete variable Kapazität c aufzufassen sei [2]). Für die Bereiche II und IV lautet dann das Ausgleichsgesetz

$$i = \frac{e}{r} + c \frac{de}{dt} + e \frac{dc}{dt}.$$

Es war nun noch die Aufgabe zu lösen, in diesen Bereichen die Momentanwerte von r und c unter der genannten Annahme zu bestimmen. Ich erwähne hier gleich, daß diese Annahme wohl den folgenden Ableitungen zu Grunde liegt, daß sie aber nicht notwendig ist, sondern daß die Methode der Analyse allgemeiner ist und das Vorliegende ein spezieller Fall.

Bei einem elektrischen Konsumapparat von der in Fig. 4, S. 11 gezeichneten Form, bei dem R und C unbekannt aber konstant sind, besteht in der Regel kein Bedürfnis, zur Berechnung von R und C aufgenommene Momentanwertkurven heranzuziehen. Anders bei variablem r und c, wo es von Interesse ist, diese Variabilität zu untersuchen. Trotz Aufnahme der Momentanwerte steht man hier scheinbar vor der Unmöglichkeit, r und c in einem bestimmten Punkt aus der einen Gleichung $i = \frac{e}{r} + c \frac{de}{dt} + e \frac{dc}{dt}$ zu bestimmen, und diese Unmöglichkeit wird von vielen Seiten (z. B. Isenburg, siehe S. 1, Fußnote 4) beklagt. Die folgende physikalisch-mathematische Methode ermöglicht indes die Bestimmung der Momentanwerte von r und c aus der i- und e-Kurve.

Ich bezeichne $\left(\frac{1}{r} + \frac{dc}{dt}\right)$ mit $\frac{1}{r'}$. Die Gleichung

$$i = \frac{e}{r} + c \frac{de}{dt} + e \frac{dc}{dt}$$

---

[1]) Momentanwerte mit kleinen Buchstaben bezeichnet; also z. B. c = Momentankapazität.

[2]) Siehe S. 11, Fig. 4.

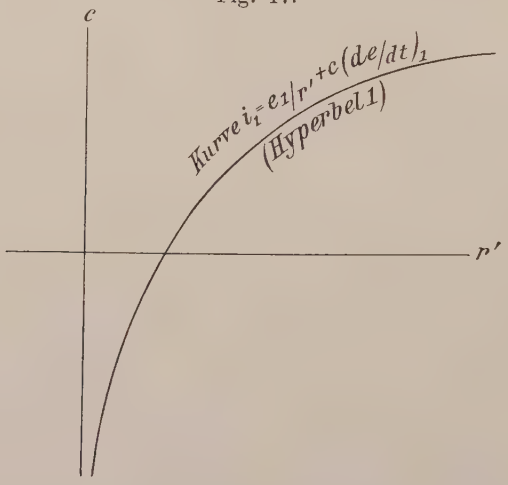
geht dann über in die Gleichung

$$i = \frac{e}{r'} + c\,\frac{de}{dt},$$

aus welcher folgt, daß r und c in jedem Moment, für den i, e und $\frac{de}{dt}$ bekannt sind (aus der aufgenommenen Kurve), nach dem Gesetz einer Hyperbel zusammenhängen. Für einen bestimmten Zeitmoment 1 gilt also die in Fig. 17 dargestellte Kurve.

Eine derartige Hyperbel läßt sich nun für jeden Moment auf-

Fig. 17.



zeichnen. Im Zusammenhang mit der Kenntnis der i-, e- (und damit der $\frac{de}{dt}$-)Kurve läßt sich daher die Differentialgleichung $i = \frac{e}{r'} + c\,\frac{de}{dt}$ auffassen als ein Hyperbelsystem etwa von der in Fig. 18 wiedergegebenen Gestalt, und es ist nur soviel bekannt, daß für die wirkliche (r', c)-Kurve in einem Moment 1 der Punkt (r_1', c_1) auf der Hyperbel 1 liegen muß.

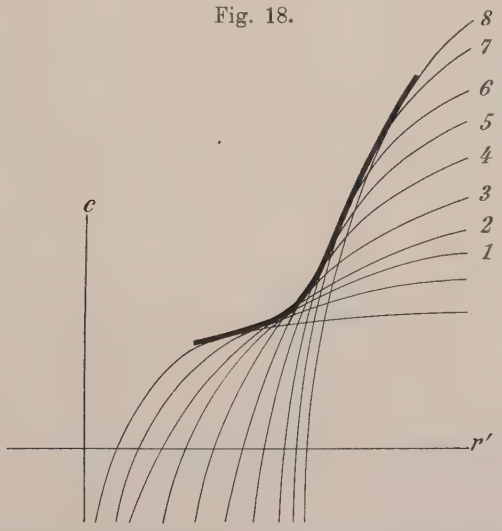
Eine mögliche (r', c)-Kurve ist die als Umhüllende des Hyperbelsystems eingezeichnete singuläre Lösung der Differentialgleichung.

Da die Umhüllende, wie man unmittelbar sieht, der bequemste und zwangloseste Weg ist, auf dem ein Punkt der (r', c)-Kurve von einer Hyperbel auf die nächst benachbarte wandern kann, haben wir vom physikalischen und philosophischen Standpunkt, wonach die Natur die bequemsten Wege vorzieht, allen Grund anzunehmen, daß die Umhüllende die wirklich auftretende (r', c)-Kurve ist. Wir können uns

vorstellen, daß der Punkt auf der Hyperbel n vermöge des Ausgleichsgesetzes, das ihm zu jeder bestimmten Zeit eine bestimmte Hyperbel als Aufenthaltsort vorschreibt, schon das Bestreben hat, sich der Hyperbel (n + 1) zu nähern, d. h. daß er gegen den Schnittpunkt beider Hyperbeln wandert u. s. f.

Vereinfacht wird die Betrachtung dadurch, daß man nun statt $\frac{1}{r'}$ das Leitvermögen $l' = \frac{1}{r'}$ einführt, dann wird $i = e \,.\, l' + \frac{de}{dt} \,.\, c$, das Kurvensystem also ein Geradensystem (s. Fig. 19).

Fig. 18.

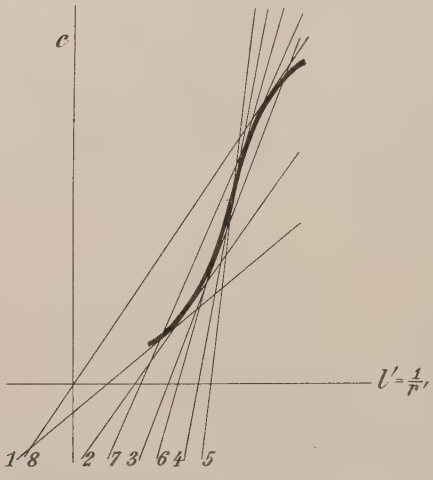


Man könnte nun einwenden, daß es doch möglich ist, eine beliebige (r', c)-Kurve, die zu dem betreffenden System von e- und i-Kurve gehört, einzuzeichnen (s. Fig. 20) und etwa mechanisch r' und c so zu variieren, daß sie dem durch die eingezeichnete Kurve vorgeschriebenen Gesetz gehorchen. Dieser ganz richtige Einwand macht darauf aufmerksam, daß die Wanderung des Punktes auf der Enveloppe nicht mit mathematischer Notwendigkeit erfolgt, und veranlaßt mich, auf die physikalische Bedingung etwas näher einzugehen, nach der der Punkt wirklich auf der Umhüllenden läuft, und damit auf die Grundlage für die Anwendbarkeit unserer Methode.

Ich möchte diese Bedingung nach einem von Nernst eingeführten Ausdruck die Bedingung der „Selbstläufigkeit“ (im Gegensatz zu „Zwangläufigkeit“) nennen. Ich verstehe darunter die Möglichkeit von physikalischen Größen, sich von selbst, ohne mechanischen Zwang,

so einzustellen, wie es der Natur der Dinge am besten entspricht (selbstläufiger Naturvorgang). In unserem Fall schreibt die Natur ein Gesetz vor, wonach die Punkte (r′, c) auf einer bestimmten Geraden sich befinden müssen. Die Selbstläufigkeit besteht darin, daß sie ohne mechanischen Zwang sich irgendwo auf der Geraden einstellen können; diese Selbstläufigkeit ist hier zweifellos garantiert im Gegensatz zu dem im Anschluß an Fig. 20 besprochenen Fall, wo Zwangläufigkeit vorausgesetzt war. Die Methode ist also in unserem Fall sicher anwendbar.

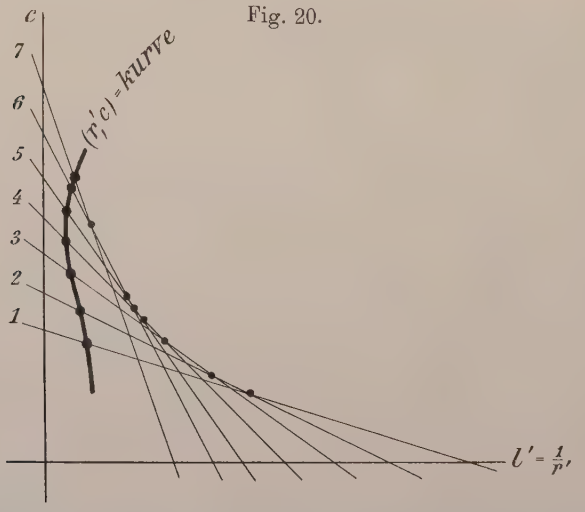
Fig. 19.



Damit ist nun die Möglichkeit bewiesen und der Weg gezeigt, die Momentanwerte r′ und c für jede Stelle der aufgenommenen Kurven, d. h. abhängig von der Zeit, zu bestimmen. Aus der Gleichung

$$\frac{1}{r'} = \frac{1}{r} + \frac{dc}{dt}$$

Fig. 20.

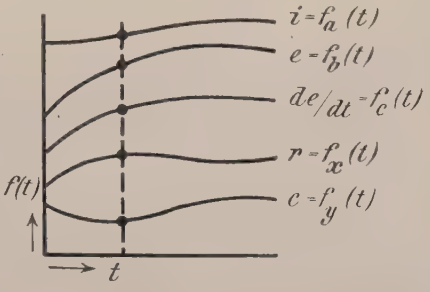


läßt sich nun, wenn man die (r′, c)-Kurve nach der gegebenen Methode bestimmt hat, unmittelbar r selbst auch berechnen.

Ich gehe nun, ehe ich zur speziellen Berechnung schreite, noch auf den Sinn und die Erweiterungsfähigkeit dieser Methode etwas ein: Wenn man für jeden Punkt der e- und i-Kurve etwa den Wert $z = \frac{e}{i}$ (d. i. den resultierenden Momentanwiderstand) bestimmt, hat man eben den Inhalt der Kurven noch lange nicht erschöpft. In der Kurve liegen noch unausgenützte Differential- und Integralbeziehungen. Was die Auswertung einiger Integralbeziehungen betrifft, so verweise ich auf die Untersuchungen im Anschluß an die Wellenstromschaltung. Hierher gehört auch etwa die Bestimmung von Kraftlinienzahlen aus der Formel $N = \int e\,dt$. — Eine Verwertung der differentiellen Beziehungen liegt nun in unserer Methode insofern vor, als mehrere Unbekannte aus einer Momentangleichung gefunden werden können dadurch, daß man auch die Momentangleichung benachbarter Punkte, d. h. eine höhere differentielle Beziehung zu Hilfe nimmt.

Damit verläßt die Methode den Boden unserer Spezialbetrachtung. Ihre allgemeine Bedeutung ist die folgende: Sind mehrere physikalische Größen als bekannte Funktionen f_a, f_b etc. (s. Fig. 21) eines und desselben Parameters, in der Regel der Zeit, gegeben, und besteht zwischen diesen Größen und weiteren Größen, die unbekannte Funktionen f_x, f_y etc. jenes Parameters sind und eine Selbstläufigkeit besitzen, eine Beziehung, die für jeden Wert des Parameters gilt, $\varphi\,(f_a, f_b, f_c \ldots, f_x, f_y \ldots) = 0$,

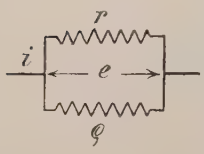
Fig. 21.



so lassen sich die f_x, f_y etc. aus den Gleichungen φ für Nachbarpunkte für jeden Wert t im allgemeinen nach der Methode der Enveloppen berechnen, indem man zu immer höheren differentiellen Beziehungen in der Nähe eines und desselben Punktes übergeht. Die Methode allgemein mathematisch zu behandeln, überschritte den Rahmen dieser Arbeit. Praktisch denke ich mir die Ausführung so, daß man zunächst mehrere Unbekannte zu einer einzigen neuen zusammenfaßt, bis nur noch zwei neue Unbekannte bleiben, die man nach der Umhüllendenmethode als Funktionen des gegebenen Parameters t darstellt. Man erhält so aus einer Funktion φ zwei neue bekannte Funktionen φ_I und φ_{II}, die weniger Unbekannte (im allgemeinen) enthalten als φ. Durch Fortsetzung des Verfahrens bestimmt

man schließlich die unbekannten Funktionen f_x etc. selbst[1]). Nicht unerwähnt will ich lassen, daß für mehrere Unbekannte die Schwierigkeiten der tatsächlichen Auswertung, die schon für den im folgenden behandelten einfachen Fall nicht gering sind, ins Ungemessene wachsen; doch werden so verwickelte Probleme auch kaum aktuell werden. —

Fig. 22.



Ferner gibt es eine ganze Anzahl Fälle, wo die Methode versagt (Ausnahmefälle); ich mache hier auf den wichtigsten aufmerksam, den ich in die Form eines physikalischen Beispiels kleide: Es ist nie möglich, bei der in Fig. 22 dargestellten Schaltung aus der i- und e-Kurve z. B. die beliebig variablen Ohmschen Widerstände r und ρ zu bestimmen. Das scheint ohne weitere Rechnung klar zu sein; bei Anwendung unserer Methode zeigt sich, daß wir es mit einem Ausnahmefall zu tun haben:

$$i = \frac{e}{r} + \frac{e}{\rho} = e \,.\, l + e \,.\, \lambda,$$

also

$$1 = \frac{l}{i/e} + \frac{\lambda}{i/e} = \frac{l}{m} + \frac{\lambda}{n}.$$

m und n bedeuten die Abschnitte auf den Ordinatenachsen. Da hier $m = n$, so haben wir es mit einer Schar paralleler Geraden zu tun, die keine Enveloppe besitzt (s. Fig. 23).

Ebensowenig sind z. B. variables r und ρ bei Hintereinanderschaltung aus der Strom- und der Gesamtspannungskurve bestimmbar.

Ich habe hier schließlich noch eine Bemerkung mathematischer Natur zu machen. Um aus der Gleichung $i = e \,.\, l' + \frac{de}{dt} \,.\, c$ die Umhüllende zu finden, muß man l' und c als konstant annehmen, wenn man zur Nachbargeraden übergeht. In der durch Differenzieren gewonnenen Gleichung $\frac{di}{dt} = \left(l' \frac{de}{dt} + c \frac{d^2e}{dt^2}\right) + \left(e \frac{dl'}{dt} + \frac{de}{dt} \frac{dc}{dt}\right)$ muß man also das zweite Glied $e \frac{dl'}{dt} + \frac{de}{dt} \frac{dc}{dt} = 0$ setzen. Mathematisch gesprochen ist dies die Bedingungsgleichung für die Umhüllende, physikalisch drückt es die Selbstläufigkeit des Prozesses aus.

---

[1]) Was die Anwendbarkeit der Methode betrifft, so glaube ich, daß sie z. B. auch zur Bestimmung statisch unbestimmter Größen in der Festigkeitslehre (bei dynamischen Problemen, Parameter t = Zeit) brauchbar sein wird, muß mir aber natürlich vorbehalten, anderweitig etwa darauf zurückzukommen.

Die nun folgende Spezialbetrachtung wird am besten das Vorgehen zur Bestimmung der Unbekannten erläutern:

Ich setze die Schaltung r # c voraus (Fig. 24) und sehe davon ab, den jedenfalls sehr kleinen, etwa noch vorgeschaltet zu denkenden

Fig. 23.

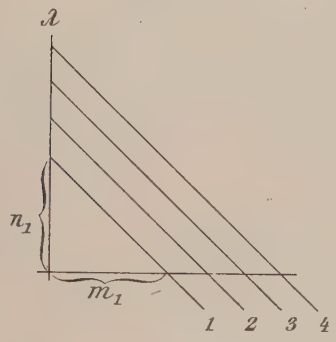


Fig. 24.

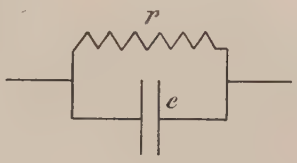
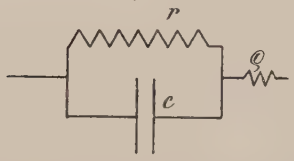


Fig. 25.



Flüssigkeitswiderstand ρ in die Schaltung einzuführen (nach Fig. 25); d. h. sein Wert wird, wenn er überhaupt eine Rolle spielt, in r und c mit einbegriffen (r vergrößernd, c verkleinernd).

Für zwei benachbarte Kurvenpunkte 1 und 2 gilt nun (Schaltung Fig. 24 vorausgesetzt)

$$i_1 = \frac{e_1}{r'} + c\left(\frac{de}{dt}\right)_1$$

und

$$i_2 = \frac{e_2}{r'} + c\left(\frac{de}{dt}\right)_2.$$

Daraus berechnet sich

$$r' = \frac{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1}{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 i_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 i_1} \quad \text{und} \quad c = \frac{i_1 e_2 - i_2 e_1}{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1}$$

(Annäherungsmethode).

Die exakte Berechnung (für unendlich benachbarte Punkte) ergibt:

$$i = \frac{e}{r'} + c\,\frac{de}{dt}$$

$$i + di = \frac{e + de}{r'} + c\left(\frac{de}{dt} + d\,\frac{de}{dt}\right)$$

oder

$$di = \frac{de}{r'} + c\,d\frac{de}{dt}$$

und aus der Gleichung für i und der für di

$$r' = \frac{e\,d\frac{de}{dt} - de\frac{de}{dt}}{id\frac{de}{dt} - di\frac{de}{dt}} = \frac{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{e}\right).e^2}{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{i}\right)i^2} = \left(\frac{e}{i}\right)^2 \frac{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{e}\right)}{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{i}\right)}$$

und

$$c = \frac{\frac{de}{dt}(edi - ide)}{\frac{de}{dt}e^2\,d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{e}\right)} = \frac{d\left(\frac{i}{e}\right)}{d\left(\frac{\frac{de}{dt}}{e}\right)}.$$

Wie schon bemerkt, wird schließlich auch r erhalten aus der Gleichung

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{r'} - \frac{dc}{dt}.$$

Obwohl nun in unserem Spezialfall (wie erwähnt) nur der Bereich II und IV für die Analyse in Betracht kommt, habe ich doch die Analyse unter der bekannten Voraussetzung auch für den Bereich I und III durchgeführt. In letzteren Bereichen ergaben sich für r und c zum Teil negative oder sonst unwahrscheinliche Werte; in den Bereichen II und IV dagegen führte das Verfahren zu befriedigenden Resultaten. Was die Ausführung der Analyse betrifft, so teile ich hier folgendes mit: Es stellte sich heraus, daß am besten nach der Annäherungsmethode (s. o.) verfahren wurde, indem für benachbarte Punkte 1 und 2 die folgenden Werte aus den Kurven entnommen wurden:

$$e_1 \text{ und } e_2,\ i_1 \text{ und } i_2,\ \left(\frac{de}{dt}\right)_1 \text{ und } \left(\frac{de}{dt}\right)_2.$$

Die $\left(\frac{de}{dt}\right)$-Kurve ist aus den aufgezeichneten Punkten $\left(\frac{de}{dt}\right)$ korrigiert. Für eine große Reihe von Punkten wurde dann r' und c nach den Formeln

$$r' = \frac{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1}{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 i_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 i_1} \quad \text{und} \quad c = \frac{i_1 e_2 - i_2 e_1}{\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 - \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1}$$

(s. S. 65) berechnet, aufgezeichnet und graphisch korrigiert.

Folgende große Schwierigkeit stellte sich dabei heraus:

Es traten häufig „Ausnahmepunkte“ (unbestimmte Werte der Umhüllenden) auf, dann nämlich, wenn Zähler und Nenner der Ausdrücke für r' und c sich nicht viel von 0 unterschieden.

Wenn z. B. $\left(\frac{de}{dt}\right)_1 e_2 = \left(\frac{de}{dt}\right)_2 e_1$, so wird im allgemeinen $r' = 0$ und $c = \infty$, wenn aber ferner $\left(\frac{de}{dt}\right)_1 i_2 = \left(\frac{de}{dt}\right)_2 i_1$, so wird $r' = \frac{0}{0}$ = unbestimmt, oder wenn statt dessen $i_1 \cdot e_2 = i_2 \cdot e_1$, so wird $c = \frac{0}{0}$ = unbestimmt. Ferner wird, wenn $\left(\frac{de}{dt}\right)_1 i_2 = \left(\frac{de}{dt}\right)_2 i_1$, $r' = \infty$; wenn $i_1 \cdot e_2 = i_2 \cdot e_1$, $c = 0$.

Schon in der Nähe der Ausnahmepunkte $\frac{0}{0}$ waren die Werte r' und c schwer zu berechnen. Auch wo $r' = 0$ oder ∞ und $c = 0$ oder ∞, wird die Genauigkeit gering, d. h. nur die Größenordnung der Werte stimmt noch. In allen diesen und ähnlichen Fällen half ich mir folgendermaßen: Wo r' schlecht bestimmt war, c aber gut, zeichnete ich die Werte c als Funktion der Zeit auf, korrigierte danach die Werte c und berechnete dann r' aus der Formel $i = \frac{e}{r'} + c \frac{de}{dt}$. Umgekehrt wurde für Stellen, wo c schlecht bestimmt war, aus den graphisch korrigierten r'-Werten c in ähnlicher Weise berechnet. Wo aber r' und c schlecht bestimmt sind, läßt die Genauigkeit der berechneten Kurven unvermeidlich zu wünschen übrig. Dies ist der Fall, besonders wenn i = konst., e = konst. (und also auch $\frac{de}{dt}$ = konst.), d. h. an horizontalen Stellen beider Kurven zugleich wird $r' = \frac{0}{0}$ und $c = \frac{0}{0}$. Hauptsächlich wegen der Umgehung der Ausnahmepunkte durch den oben angeführten Kunstgriff erfordert die Kurvenanalyse eine sehr große Arbeit; der Wert der Analyse liegt aber nicht sowohl in der völligen Untersuchung einer Kurve als in der Möglichkeit, auf-

fallendes Verhalten in einzelnen Punkten von Kurven auf seinen Grund zu erforschen.

Die nach der beschriebenen Methode sich ergebenden Werte von c und r sind in Rubrik 7 und 8 der Zahlentafel S. 54 und 55 aufgeführt (für die Bereiche II und IV). Man erkennt zunächst, daß c der Größenordnung nach dieselben Werte hat wie das C der Kolonne 6, ferner, daß auch hier c bei der Ladung im allgemeinen größer ist als bei der Entladung.

Im Bereich II sinkt die Kapazität von ca. 30 auf ca. 0 Mfd. Dabei steigt zunächst der Widerstand bis 123° auf ca. 500 Ohm und sinkt dann zu immer kleineren Werten. Die Abnahme der Kapazität erklärt sich aus der mit dem Anwachsen der negativen Ladung $\int i\,dt$ immer dicker werdenden dielektrischen Formierungsschicht, das Maximum des Ohmschen Widerstandes (bei 123°) daraus, daß die Schicht allmählich an einzelnen Stellen vermöge der höher werdenden Spannung durchbrochen wird. Ich bemerke hier ausdrücklich, daß ich auf die Zahlenwerte als solche (wegen der rechnerischen Ungenauigkeiten bei der Analyse) weniger Wert lege, als auf ihren Verlauf. Die Uebergänge von einem Bereich in den anderen können nicht genau dargestellt werden. So ist zwar klar, daß bei 128° noch Polarisation (s. Rubrik 5!) und schon Kapazität (s. Rubrik 6 und 7!) herrschen, aber welcher Prozentsatz auf die eine oder andere trifft, läßt sich nicht bestimmen. Ebensowenig läßt sich der Punkt festlegen, von wo an die Zelle wieder als rein Ohmscher Widerstand aufgefaßt werden kann. Fest steht nur, daß bei 129,6° der Strom erst ins Negative überschlägt und daß, da der negative Strom erst die dielektrische Schicht bildet, erst von hier an Kapazität denkbar ist und ferner, daß bei 113½° c ins Negative übergeht, d. h. daß von diesem Moment an keine Kapazität mehr herrschen kann. Auffallenderweise ist gerade in diesem Punkt $\frac{e}{i}$ ein Maximum und steigt von hier an i schnell ins Negative. Wir können diesen Punkt also wohl als den Punkt des eigentlichen Stromdurchbruchs betrachten (bei 53½ Volt).

Im Bereich IV sinkt die Kapazität (mit Ausnahme eines bei 73° einsetzenden unregelmäßigen Ansteigens auf 18 Mfd.) ebenfalls beständig und erreicht bei 73° den Wert von 2 Mfd., bei 65¾° den Wert von 0 Mfd. Der Widerstand wächst zu ungeheuer großen Werten an. Bei 84° hatten wir $\frac{e}{i} = \infty$; wenn hier die Kapazitätswirkung schon bedeutend ist, so muß der wirkliche Widerstand dort nicht $= \infty$ sein,

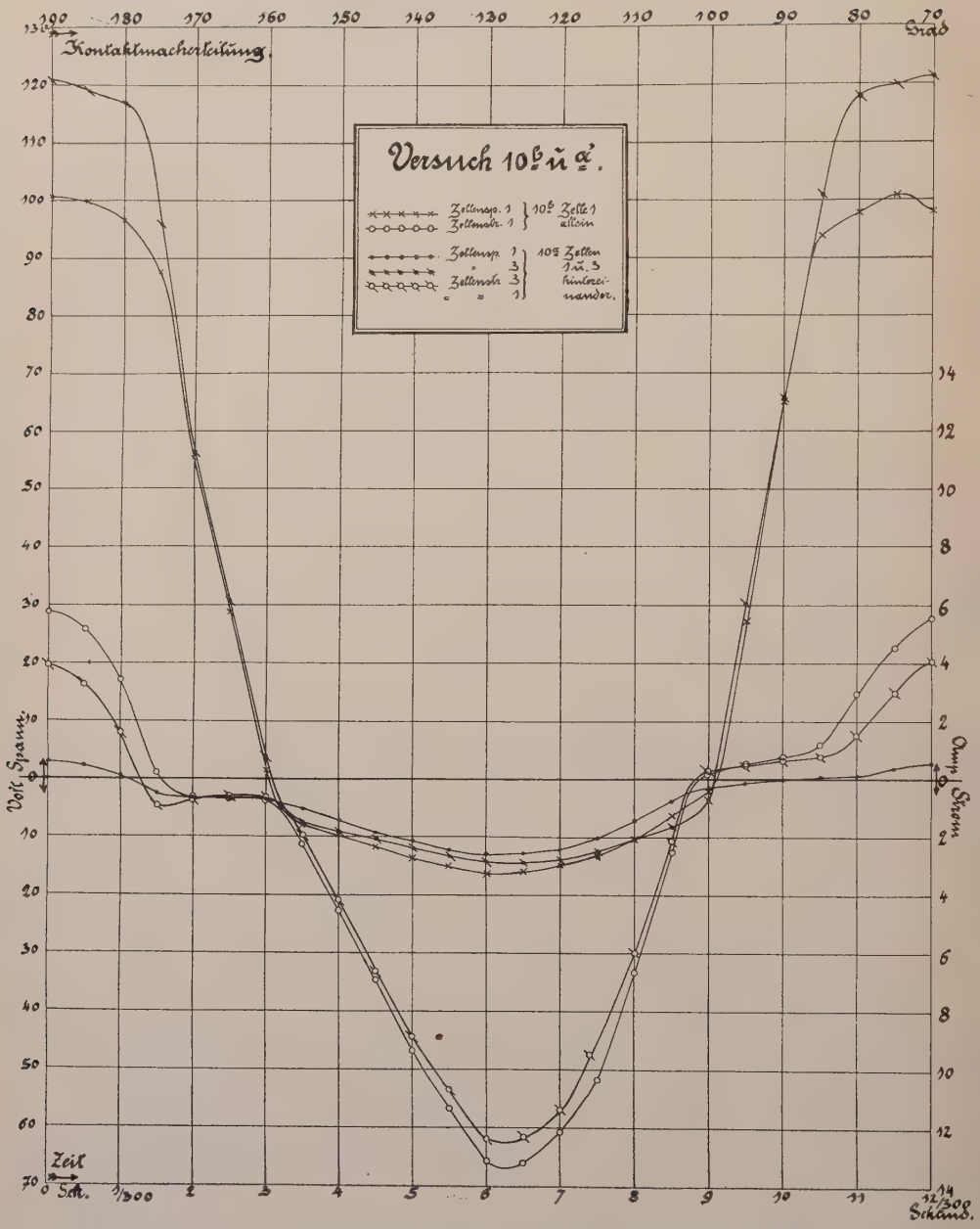
weil das Glied $e\frac{dc}{dt} + c\frac{de}{dt}$ eventuell den Strom i zu 0 machen kann, selbst wenn $\frac{e}{r} < 0$ ist. Ueber den Anteil der Kapazität läßt sich aber natürlich nichts Bestimmtes sagen, wie schon auseinandergesetzt wurde. Daß im Verlauf des Bereiches IV der Widerstand immer größer wird, erklärt sich daraus, daß die zerstörte Schicht sich mit sinkender Spannung allmählich wieder bildet; aus demselben Grund wird die Kapazität immer kleiner. Die unregelmäßige Welle im Verlauf der Kapazität (s. o.!) kann vielleicht daher kommen, daß durch den positiven Strom die neugebildete Schicht wieder zerstört wird; doch muß ich das dahingestellt sein lassen. Natürlich sind hier auch die Werte r unsicher, da man nicht recht weiß, welchen Wert für $\frac{dc}{dt}$ man in die Formel $\frac{1}{r} = \frac{1}{r'} - \frac{dc}{dt}$ einsetzen soll. Bemerkenswert ist jedenfalls, daß von großen Widerständen ausgehend sich der Uebergang zu den immer kleiner werdenden Widerständen $\frac{e}{i}$ im Bereich I zwangloser gestaltet, als bei der Annahme eines Widerstandes = 0 bei 66,9° (s. Rubrik 4), wo dann der Widerstand zunächst steigen und dann wieder fallen müßte. Wie der Punkt 129,6° uns den Wert von — 5,00 Volt für die Polarisationsspannung sicher ergab, so erhalten wir hier einen Wert der Kapazität von 17 Mfd. bei 66,9°, da bei $e = 0$ $i = c\frac{de}{dt} + e\frac{dc}{dt}$ ist und $\frac{e}{r}$ nicht in Frage kommt.

Damit ist nun der Kreis des Vorgangs geschlossen; ich hoffe klargelegt zu haben, wie sich der Wechsel von Ohmscher Widerstands-, Polarisations- und Kapazitätswirkung in der Zelle abspielt.

Es erübrigt noch, die merkwürdige Erscheinung zu erklären, die schon von einigen beobachtet wurde, daß, wenn man zwei Zellen hintereinanderschaltet, die eine die ganze Spannung aufnimmt, die andere fast keine, trotzdem doch derselbe Strom durch beide Zellen geht[1]). Mayrhofer vermutet (s. S. 5) eine Veränderung der elektrolytischen Eigenschaften des Stromes beim Passieren einer Zelle, so daß er eine zweite nicht mehr formieren könne. Wenn man aber nur annimmt, daß ein gewisser Stromstoß und eine gewisse Zeit zur Formierung nötig ist, so ist klar, daß nur eine Zelle sich richtig

[1]) Diese Beobachtung widerlegt die Ansicht von Graetz (s. S. 4).

Graphische Darstellung XXIII.



formieren kann. Die beste Zelle formiert sich am schnellsten und drückt dabei den Strom sofort herab, so daß die Dauer des Formie-

rungsstoßes für die Formierung der weniger guten Zellen nicht genügt[1]). In den Kurven zu Versuch 10 b und 10 a′ kommt dies zur Darstellung[2]): Versuch 10 b zeigt zunächst, daß Zelle 1 gut ist und funktioniert. Bei Zuschalten der besseren Zelle 3[3]) (Versuch 10 a′) stellt sich an Zelle 1 nur noch eine minimale Spannung ein; d. h. Zelle 1 wird offenbar nicht formiert, sondern wirkt nur als ein kleiner Flüssigkeitswiderstand[4]). Im übrigen bieten die Versuche 10 nichts Neues. Eine teilweise durchgeführte Analyse des Stroms der Zelle 3 ergab ganz die Erscheinungen von Versuch 9 a.

Soviel über die inneren Vorgänge in einer Aluminiumelektrolytzelle in einer Periode.

B. Versuche nach der „Wellenstrommethode".

Nachdem wir nun das Verhalten der Zelle in einer Periode studiert haben, gehen wir dazu über, die technisch interessanten Werte beim Gleichrichtevorgang, die Mittel-, Effektiv- und Leistungswerte einer genauen Untersuchung zu unterwerfen.

a) Bestimmung der Werte durch Planimetrierung der Kurven.

Diese Werte wurden zum größten Teil aus Versuchen mit der Wellenstromschaltung bestimmt; bei einigen Versuchen wurden sie indes den aufgenommenen Kurven entnommen. Wir erwähnten schon, daß eine Art der Ausnützung der Integraleigenschaften der Kurven darin bestehe[5]).

Aus den Kurven wurden folgende Integralwerte gewonnen:

1. Der Mittelwert von e (durch Planimetrieren der e-Kurve)

$$\overline{E} = \frac{\int_0^{2\pi} e \, d\varphi}{2\pi},$$

---

[1]) Die Zeit der Formierungswellen von der Größenordnung der $^1/_{100}$ Sek. dürfte eher stimmen als die von Wilson für die Formierung angenommene (s. S. 5, $^1/_{16}$ Sek.).

[2]) Die charakteristischen Versuchsdaten s. u. unter „Versuche nach der Wellenstrommethode".

[3]) Und zwar ward in der Richtung Al—Pb Zelle 3 hinter Zelle 1 geschaltet.

[4]) Ich vermute, daß die Spannungskurve der Zelle 1 in Vers. 10 a etwas nach unten verschoben ist (kleiner Fehler?).

[5]) Siehe S. 63.

2. der Mittelwert von i (durch Planimetrieren der i-Kurve)

$$J = \frac{\int_0^{2\pi} i \, d\varphi}{2\pi},$$

3. der Effektivwert von e

$$\hat{E} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e^2 \, d\varphi}$$

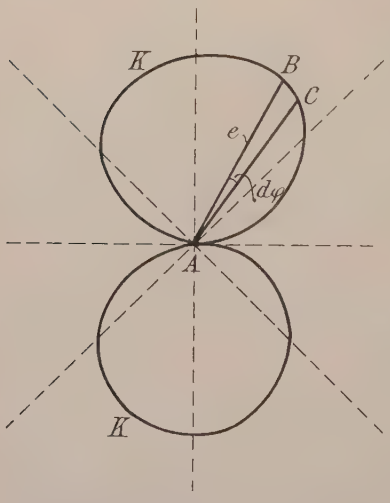
und

4. der Effektivwert von i

$$\hat{J} = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i^2 \, d\varphi}$$

nach der folgenden bekannten Methode: Die Ordinaten e (bezw. i) wurden von einem 0-Punkt aus als Radienvektoren aufgetragen (siehe Fig. 26), wobei 120 ° Kontaktmacherteilung (= 1 Periode) durch den vollen $\sphericalangle 2\pi$ dargestellt wurden.

Fig. 26.



$\frac{e^2 \, d\varphi}{2}$ = Fläche des kleinen ΔABC.

Der doppelte Inhalt der von Kurve K umschlossenen Fläche

$$2F = 2 \int_0^{2\pi} \frac{e^2 \, d\varphi}{2} = \int_0^{2\pi} e^2 \, d\varphi$$

wurde durch Planimetrierung bestimmt und in die Formel für $\hat{E}$ (bezw. für $\hat{J}$) eingesetzt. Das Vorzeichen von e (bezw. i) kann unberücksichtigt bleiben, weil ΔABC sowohl den Inhalt $\frac{e^2 \, d\varphi}{2}$ als den $\frac{(-e)^2 \, d\varphi}{2}$ darstellt.

5. wurde die Leistung $\frac{\int_0^{2\pi} e \, i \, d\varphi}{2\pi}$ bestimmt, indem in das Polarsystem, in welchem e und i eingetragen waren, auch noch (e + i) als

Radius eingetragen wurde für die Momente, wo e und i beide positiv oder beide negativ waren, und (e — i), bezw. (i — e), wenn beide verschiedenes Vorzeichen hatten. Man erhält so in einem Moment drei Dreiecksflächen

$$\frac{(e \pm i)^2 \, d\varphi}{2}, \quad \left[\text{bezw. } \frac{(i-e)^2 \, d\varphi}{2}, \text{ wenn } i > e \text{ in dem betr. Maßstab}\right],$$

$$\frac{e^2 \, d\varphi}{2} \text{ und } \frac{i^2 \, d\varphi}{2},$$

also durch Subtraktion der beiden letzteren von der ersten

$$\frac{\begin{pmatrix} e^2 \pm 2\,e\,.\,i + i^2 \\ -e^2 \qquad -i^2 \end{pmatrix} d\varphi}{2} = \pm\, e\, i\, d\varphi$$

mit dem Vorzeichen der Momentanleistung. Die mit $\frac{1}{2\pi}$ multiplizierte Differenz der gesamten planimetrierten Flächen:

$$\frac{1}{2\pi}\left[\int_0^{2\pi} \frac{(e \pm i)^2 \, d\varphi}{2} - \int_0^{2\pi} \frac{e^2 \, d\varphi}{2} - \int_0^{2\pi} \frac{i^2 \, d\varphi}{2}\right]$$

gibt also gerade die Arbeitsleistung

$$\frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} \pm\, e\, i\, d\varphi,$$

wobei die einzelnen Momentanleistungen mit dem richtigen Vorzeichen schon eingerechnet sind.

Eine Ausführung dieser Methode liegt vor in der graphischen Darstellung XVI. Aus den graphischen Darstellungen XV und XVI (desgl. aus Versuch 7) ersieht man den Einfluß der Einschaltung der Instrumente der Wellenstromschaltung auf die Kurvenform (s. S. 52 und 53). Man erkennt, daß durch Anschalten dieser Instrumente sich die Verhältnisse etwas ändern. Für die Mittelwerte macht diese Aenderung der Kurven fast gar nichts aus, weil der Unterschied der Flächen sehr klein ist gegen die Gesamtflächen. Bei den Effektivwerten heben sich die Aenderungen gegenseitig teilweise auf: Verkleinerung der Momentanwerte auf der einen Seite, Vergrößerung auf der anderen. Am stärksten beeinflußt wird der negative Strom, der viel größer wird. Im ganzen wird der aus den Wellenstrommessungen sich ergebende Mittelwert zu gering, d. h. die Umsetzung von Wechselstrom in Gleich-

strom wird in Wirklichkeit eher günstiger, als sich aus der Angabe der Instrumente berechnet. In den Tabellen ist stets eigens angegeben, wenn die Mittel- und Effektivwerte aus Planimetrierungen gewonnen sind.

b) Bestimmung der Werte aus Amperemeter-, Voltmeter- und Wattmeterablesungen.

Es wurde bei den Versuchen Wert darauf gelegt, die nötigen Korrekturen möglichst klein zu machen, und wenn z. B. der Strom im Elektrolyten ein etwas anderer war als der im Konsumwiderstand (Stromverbrauch der Instrumente), entweder durch Regulierung auf gleichen Strom (beim Versuch) oder durch Reduktion der Werte möglichst einen einheitlichen Stromkreis der Berechnung zu Grunde zu legen. Unter keiner Bedingung aber durften die Korrekturen sehr erheblich über den Bereich der Meßgenauigkeit hinausgehen; nur bei einigen Meßwerten, die an und für sich sehr klein und ohne besondere Bedeutung waren, konnte dies nicht umgangen werden.

Die im folgenden besprochenen Werte (s. Tabellen) sind bereits nach den Eichkurven (und eventuell für Stromverbrauch und Spannungsabfall) korrigierte Versuchswerte. Es ist in der Regel mitgeteilt für Generator, Zelle und Konsum

$\hat{\mathfrak{E}}$, $\overline{\mathfrak{E}}$, $\hat{\mathfrak{J}}$, $\overline{\mathfrak{J}}$ und $\hat{\mathfrak{W}}$ (durch Messung gewonnen),

$\hat{\mathfrak{E}} = \sqrt{\hat{\mathfrak{E}}^2 - \overline{\mathfrak{E}}^2}$ [1]),

$\tilde{\mathfrak{J}} = \sqrt{\hat{\mathfrak{J}}^2 - \overline{\mathfrak{J}}^2}$,

$\overline{\mathfrak{W}} = \overline{\mathfrak{E}} \,.\, \overline{\mathfrak{J}}$,

$\dot{\mathfrak{W}} = \hat{\mathfrak{W}} - \overline{\mathfrak{W}}$ (durch Rechnung daraus bestimmt).

Aus den beiden Gleichstromniveaus errechnet sich der äquivalente Gleichstromwiderstand $\overline{\mathfrak{R}} = \frac{\overline{\mathfrak{E}}}{\overline{\mathfrak{J}}}$.

Für den übergelagerten Wechselstrom bestimmt man zunächst die Phasenverschiebung $\tilde{\varphi}$ [2]) aus der Formel $\cos \tilde{\varphi} = \frac{\dot{\mathfrak{W}}}{\dot{\mathfrak{E}} \,.\, \dot{\mathfrak{J}}}$ und daraus

[1]) Wir ziehen einen äquivalenten Sinusstrom zum Vergleich heran, wie dies bei Wellenstromuntersuchungen üblich ist.

[2]) Ich bezeichne auch diesen $\sphericalangle$ mit dem $\sim$-Zeichen, weil man ja auch eine effektive Phasenverschiebung $\hat{\varphi}$ aus der Formel $\cos \hat{\varphi} = \frac{\hat{\mathfrak{W}}}{\hat{\mathfrak{E}} \,.\, \hat{\mathfrak{J}}}$ aufstellen könnte.

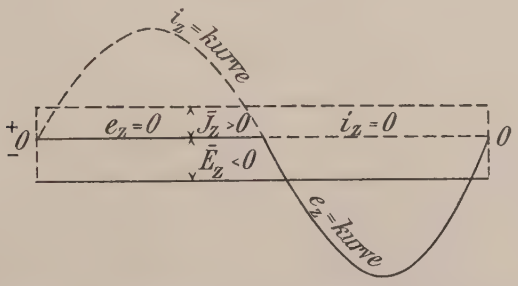
ferner sin $\overset{\backsim}{\varphi}$. Der Wechselstrom $\overset{\backsim}{J}$ läßt sich im Polardiagramm in zwei Komponenten $\overset{\backsim}{J}\cos\overset{\backsim}{\varphi}$ (Wattkomponente) und $\overset{\backsim}{J}\sin\overset{\backsim}{\varphi}$ (wattlose Komponente) spalten, denen die folgenden Ausgleichsbeziehungen entsprechen:

$$\overset{\backsim}{R}^{1}) = \frac{\overset{\backsim}{E}}{\overset{\backsim}{J}\cos\overset{\backsim}{\varphi}} \quad \text{und} \quad \omega\,\overset{\backsim}{C}^{1}) = \frac{\overset{\backsim}{J}\sin\overset{\backsim}{\varphi}}{\overset{\backsim}{E}}.$$

(ω setze ich durchweg $= \pi \,.\, z$, weil ich einzig den Vergleich mit Sinusstrom durchführen will.)

Hier ist ein Widerstand $\overline{R}_z{}^{2}) < 0$ zu erwarten, weil $\overline{J}$ positiv und $\overline{E}$ negativ sein wird, wie z. B. aus der Betrachtung der Kurven der idealen Zelle sich augenfällig ergibt (s. Fig. 27).

Fig. 27.



Dieser negative Widerstand ist natürlich eine fiktive (aber für die Rechnung sehr geeignete) Größe; er besagt, daß die Zelle sich wie eine Gleichspannungsquelle verhält, die gegen die Generatorspannung arbeitet. Zugleich stellt die Zelle einen Wechselstromwiderstand $\overset{\backsim}{R}$ in Parallelschaltung zu einer effektiven Kapazität $\overset{\backsim}{C}$ dar. Die Zelle charakterisiert sich also als ein Gemisch von Wechselstromwiderstand und Gleichstromquelle.

Auch $\overline{W}_z = \overline{E}_z \,.\, \overline{J}_z$ wird negativ, während $\overset{\backsim}{W}_z$ positiv ist. $\overset{\backsim}{W}_z$ ist daher $> \overset{\backsim}{W}_z$; d. h. die Zelle nimmt Wechselstromleistungen

---

[1]) Ich bezeichne R und C mit dem $\backsim$-Zeichen, weil man auch einen effektiven Ohmschen Wellenstromwiderstand $\overset{\backsim}{R} = \frac{\overset{\backsim}{E}}{\overset{\backsim}{J}\cos\overset{\backsim}{\varphi}}$ und eine effektive Kapazität $\overset{\backsim}{C} = \frac{\overset{\backsim}{J}\sin\overset{\backsim}{\varphi}}{\omega\,\overset{\backsim}{E}}$ einführen könnte.

[2]) Auch hier und im folgenden bedeuten wieder Index g Generator, z Zelle, c Consum.

auf (wie ein Konsumkörper) und gibt Gleichstromleistung ab (wie ein Generator); die Differenz $\grave{W}$ ist der Wattverbrauch der Zelle, eine Verlustgröße.

c) Einführung von Definitionen für den „Wirkungsgrad der Umformung“ (Umsetzungsgrad).

Damit komme ich auf den sogenannten Wirkungsgrad der Umformung von Wechselstrom in Gleichstrom zu sprechen, einen Begriff, mit dem allgemein gearbeitet wird, ohne daß irgendwo eine Definition dafür gegeben würde, wie z. B. Heinke besonders beklagt. Alle Angaben von Wirkungsgradszahlen sind aber wertlos, wenn nicht hinzugesetzt wird, was darunter verstanden wird, falsch, wenn eine unrichtige Definition zu Grunde liegt.

Da es hier im wesentlichen auf die Güte der „Umsetzung“ von Wechselstrom in Gleichstrom ankommt, die klein sein kann, auch wenn der Energieverbrauch des Gleichrichters nicht groß und daher der „Wirkungsgrad“ groß ist, führe ich im folgenden den Begriff des „Umsetzungsgrades“ ein.

Es sind mehrere Definitionen möglich, deren jede von einem etwas anderen Gesichtspunkt ausgeht. Ich erwähne davon drei:

1. Der Totalumsetzungsgrad $\eta_t = \frac{\bar{W}_c}{\grave{W}_g} = \frac{\bar{E}_c \cdot \bar{J}_c}{\grave{W}_g}$ setzt die Gleichstromleistung im Konsumkörper in Verhältnis zu der gesamten vom Generator abgegebenen Leistung.

2. Das Stromverhältnis (Stromumsetzungsverhältnis) $\alpha = \frac{\bar{J}}{\grave{J}}$ gibt an, wieviel Prozente des Effektivstromes, mit dem der Stromkreis belastet ist, das Gleichstromniveau ausmachen.

3. Der Zellenumsetzungsgrad $\eta_z = \frac{\bar{W}_z}{\grave{W}_z} = \frac{\bar{E}_z \cdot \bar{J}_z}{\grave{W}_z}$ gibt an, wieviel von der der Zelle zugeführten Wechselstromleistung als Gleichstromleistung an den Zellenklemmen verfügbar wird.

[Oder $\eta_z' = \frac{\bar{W}_z}{\tilde{W}_z}$ gibt an, wieviel von der gesamten in der Zelle umgesetzten Leistung in Gleichstromleistung übergeht.]

Bei den folgenden Versuchsmitteilungen fehlt nie die Angabe, welchen Umsetzungsgrad ich gerade meine.

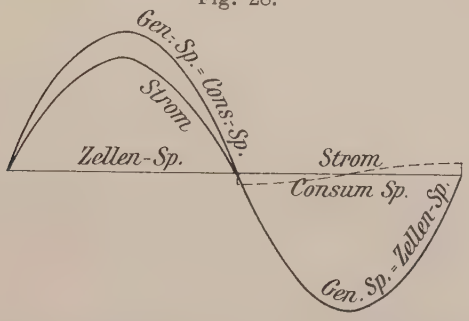
b) Der Umsetzungsgrad einer idealen Zelle.

Wie erwähnt, fehlt bei früheren Autoren durchweg die Wirkungsgraddefinition. Bis auf wenige Ausnahmen (z. B. Mitkewitsch)[1] erzielten die meisten Experimentatoren, nach ihrer Meinung, jedenfalls einen vorzüglichen Wirkungsgrad. Ich selbst konnte indes auch bei meinen besten Versuchen[2]) nie einen größeren Umsetzungsgrad als

$$\eta_t = \text{ca. } 30\,\%,$$
$$\alpha = \text{ca. } 60\,\%$$

erzielen. Es lag nahe, zu berechnen, ob η_t und α der idealen Zelle (s. Definition S. 35, Fig. 15) den Wert 100 % überhaupt erreichen können, ganz ebenso wie man den möglichen Wirkungsgrad einer idealen Wärmekraftmaschine daraufhin untersucht. Es wurden also

Fig. 28.



für die Kurven einer idealen Zelle (s. Fig. 28) die folgenden Werte berechnet (unter Voraussetzung rein Ohmschen Belastungswiderstandes):

1. $$\eta_t = \frac{\bar{W}_c}{\hat{W}_g} = \frac{\bar{E}_c \,.\, \bar{J}_c}{\hat{W}_g}.$$

Es sei $e' =$ Maximalspannung,
$i' =$ Maximalstrom.

Dann gilt:

$$\bar{W}_c = \underbrace{\frac{\int_0^{\pi} e' \sin\alpha \, d\alpha}{2\pi}}_{\bar{E}_c} \cdot \underbrace{\frac{\int_0^{\pi} i' \sin\alpha \, d\alpha}{2\pi}}_{\bar{J}_c}$$
$$= \frac{e' i'}{4\pi^2} \left[(\cos\alpha)_0^{\pi}\right]^2 = \frac{e' i'}{\pi^2}$$

[1]) Maximal 50 %. [2]) Mit einer Zelle.

und

$$\tilde{W}_g = \frac{\int_0^\pi (e' \sin\alpha)(i' \sin\alpha)\, d\alpha}{2\pi}$$ [1]

$$= \frac{e' i'}{2\pi} \int_0^\pi \sin^2\alpha\, d\alpha = \frac{e' i'}{2\pi}\left[-\frac{1}{2}\sin\alpha\cos\alpha + \frac{\alpha}{2}\right]_0^\pi$$

$$= \frac{e' i'}{2\pi} \cdot \frac{\pi}{2} \qquad = \frac{e' i'}{4},$$

d. h. für die ideale Zelle ist

$$\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g} = \frac{4}{\pi^2} = \frac{4}{9{,}88} = 40{,}5\ \%.$$

Da, wie wir wissen, noch kapazitive[2]) Wirkung eintritt ($\overline{W}$ gleich groß bleibt, $\tilde{W}$ aber größer wird), so sind vielleicht mehr als 35 % überhaupt nicht erreichbar. Nehmen wir diese Zahl an, so heißt das: Es können bei Umwandlung des Stromes in einer einzigen Zelle überhaupt nicht mehr als ca. 35 % der von einem Wechselstromgenerator abgegebenen Leistung einem Konsumkörper als Gleichstromleistung zugeführt werden. Alle Beobachtungen, bei denen mehr herauskäme, wären sicherlich falsch.

2. $\alpha = \frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$.

$$\overline{J} = \frac{\int_0^\pi i' \sin\alpha\, d\alpha}{2\pi} = \frac{i'}{\pi}.$$

$$\tilde{J} = \sqrt{\frac{\int_0^\pi i'^2 \sin^2\alpha\, d\alpha}{2\pi}} = i' \sqrt{\frac{\int_0^\pi \sin^2\alpha\, d\alpha}{2\pi}}$$

$$= i' \sqrt{\frac{\pi}{2 \cdot 2\pi}} = \frac{i'}{2}.$$

Also

$$\alpha = \frac{\overline{J}}{\tilde{J}} = \frac{2}{\pi} = 63{,}6\ \%.$$

---

[1]) Da von π bis 2π $e \cdot i = 0$ ist.

[2]) Gestrichelte Kurve in Fig. 28.

Da beim Auftreten kapazitiven Stroms $\bar{J}$ gleich bleibt, $\tilde{J}$ aber größer wird, so folgt, daß das Gleichstromniveau (bei einer Zelle) höchstens ca. 60 % des effektiven Stromwertes betragen kann.

Da aber in einer solchen idealen Zelle nichts verloren gehen kann (Gesetz von der Erhaltung der Kraft), so wird

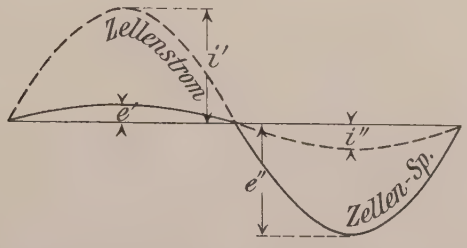
$$3. \qquad \eta_z = \frac{\bar{W}_z}{\tilde{W}_z} = \frac{\bar{E}_z \cdot \bar{J}_z}{\tilde{W}_z} = 1 = 100\,\%.$$

Das heißt: Günstigstenfalls (Verlustlosigkeit und vollkommene Stromumsetzung in der Zelle vorausgesetzt), wird die von der Zelle abgegebene Gleichstromleistung gleich der aufgenommenen Wechselstromleistung und $\tilde{W}_z = 0$ (Wattverbrauch der Zelle)

$$\left[\eta_z' = \frac{\bar{W}_z}{\tilde{W}_z} \text{ wird im idealen Fall} = \infty\right].$$

Allein auch η_z wird sich dem Werte 1 nicht leicht nähern, ja, wie die Versuche zeigen, ist η_z besonders gering. Um dies zu erklären,

Fig. 29.



stelle ich eine kurze überschlägige Berechnung an: Ich kann in erster Annäherung wohl einen sinusförmigen Verlauf der Kurven annehmen (s. Fig. 29):

Durch eine kleine Rechnung folgt dann, wenn die Werte '' mit richtigem, nämlich negativem Vorzeichen eingesetzt werden:

$$\bar{E}\,^{1}) = \frac{e'' + e'}{\pi},$$

$$\bar{J} = \frac{i' + i''}{\pi},$$

$$\bar{W} = \bar{E} \cdot \bar{J} = \frac{(e'' + e')\,(i' + i'')}{\pi^2},$$

[1]) Der Index z ist in dieser Berechnung als überflüssig weggelassen.

$$\tilde{\bar{W}} = \frac{e' \cdot i' + e'' \cdot i''}{4}$$

und daraus

$$\tilde{W} = \tilde{\bar{W}} - \bar{W} = \frac{e' i' + e'' i''}{4} - \frac{(e'' + e')\,(i' + i'')}{\pi^2}$$

und daraus nach einiger Rechnung

$$\eta_z = \frac{\bar{W}}{\hat{W}} = \frac{1}{\frac{\pi^2}{4} \cdot \frac{1}{1 + \frac{e'' i' + e' i''}{e' i' + e'' i''}} - 1}$$

Für den idealen Fall, wo $e' = 0$ und $i'' = 0$, wird in der Tat $\alpha = -1$ (mit dem negativen Vorzeichen versehen, weil $\bar{W} < 0$, $\hat{W} > 0$ [s. S. 75]).

Wenn nun auch der Umsetzungsgrad $\alpha = \frac{\bar{J}}{\hat{J}}$ den maximal möglichen Wert hätte, d. h. $i'' = 0$ wäre, so wird doch sicherlich $e' > 0$. Es wird nun für diesen praktischen Idealfall

$$\eta_z = \frac{1}{\frac{\pi^2}{4} \frac{1}{1 + \frac{e''}{e'}} - 1} = \frac{1}{2{,}46 \cdot \frac{1}{1 + e''/e'} - 1}.$$

Wenn z. B. $i' = 10$ Amp. und der Widerstand der Zelle in der Richtung Pb — Al im Durchschnitt selbst nur 1 Ohm wäre, so folgte, da dann $e' = 10$ Volt, z. B. für $e'' = -100$ Volt

$$\eta_z = \frac{1}{2{,}46 \frac{1}{1 - 100/10} - 1} = \frac{1}{\frac{2{,}46}{-9} - 1} = \frac{1}{-1{,}2735} = -0{,}785,$$

also 78,5 %.

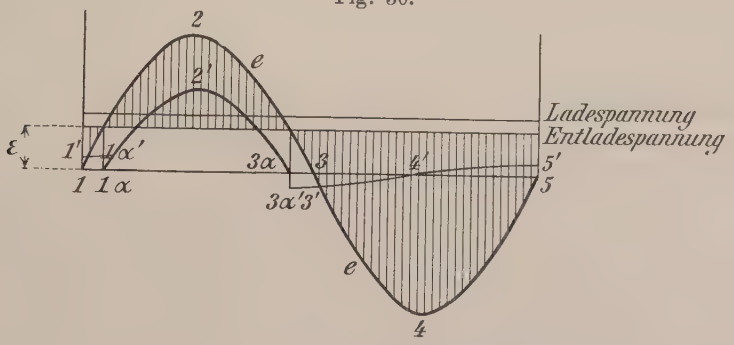
Ist aber z. B. auch $i'' = 5\,\%$ von i' (was den kühnsten bei der ersten Veröffentlichung von Graetz ausgesprochenen Erwartungen entspräche), so folgt für denselben Fall

$$\eta_z = \frac{1}{2{,}46 \frac{1}{1 + \frac{-100 \cdot 10 + 10\,(-0{,}5)}{10 \cdot 10 + 100 \cdot 0{,}5}} - 1} = -0{,}699,$$

also 69,9 %. Es gelang mir indes in keinem Versuch, auch nur diesen Wert zu erreichen.

Zur Erklärung des kleinen Umsetzungsgrades selbst der idealen Zelle möchte ich hier nur noch anführen, daß eine solche Aluminium-Elektrolytzelle sich etwa so verhält wie ein rotierender Umformer mit nur einem induzierten Draht und nur einem Pol, eine 4-Zellenbatterie wie ein Umformer mit einem Draht und zwei Polen. Ein derartiger Umformer würde einen Gleichstrom mit starken darübergelagerten Wellen liefern. Ein guter rotierender Umformer (und auch jede Gleichstrommaschine) muß so viele Drähte haben, daß die Wechselstromwellen gegenüber dem Gleichstromniveau nicht mehr in Betracht kommen; damit erhält er einen so guten Umsetzungsgrad, daß der elektrolytische Umformer von vornherein nicht mehr konkurrenzfähig ist, außer wo es auf guten Umsetzungsgrad nicht ankommt.

Fig. 30.



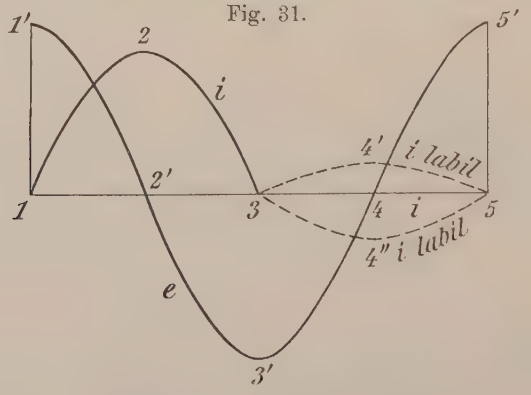
1 2 3 4 5 Gen.-Sp., 1 1α 2' 3α 3 4' 5 Ohmscher Strom,
1' 1α' 1α 3α 3α' 3' 4' 5' Kapaz. Strom.

Infolge dieser prinzipiell ungünstigen Verhältnisse glaube ich auch nicht, daß bei anderen Belastungsarten bessere Resultate erwartet werden können. Aus äußeren Gründen wurde bei dieser Arbeit nur mit Ohmschem Widerstand (dem einfachsten Belastungsfall) gearbeitet. Für eine Anwendung des Gleichrichters in der Praxis käme in Frage (außer Belastung mit Gleichstrommotoren, wohl dem seltensten Fall) hauptsächlich 1. Belastung mit Akkumulatorenbatterien (Ladung von Batterieen mit Wechselstrom), 2. Belastung mit induktivem Widerstand (Erregung von Wechselstrommaschinen mit Wechselstrom). Nur der Versuch kann entscheiden, wie sich die Zelle in diesen beiden Fällen verhalten wird. Mit ziemlicher Wahrscheinlichkeit lassen sich indes folgende überschlägige Erwägungen anstellen:

1. Fig. 30 stellt den Fall dar, daß ideale Zelle und Akkumulatorenbatterie in Serie an einen Wechselstromgenerator gelegt werden.

Dieser Fall unterscheidet sich von dem der Belastung mit Ohmschem Widerstand nur dadurch, daß das Niveau der Gegenspannung von 0 Volt auf die Höhe der Entladespannung der Batterie verlegt wird. Es wird daher nur auf dem Stück von 1α bis 3α und nur von einer Spannung $(e - \varepsilon)$ positiver Strom getrieben. Die positive Stromwelle wird also weniger lang und hoch sein als bei Belastung mit entsprechend viel Ohmschem Widerstand. Die negative Spannung dagegen wird $= (e + \varepsilon)$, also größer werden und während längerer Zeit wirken, daher eher den Strom zum Durchbruch ins Negative bringen. Es wird also im ganzen ein schlechterer Umsetzungsgrad zu erwarten sein. Der kapazitive Strom $3\alpha' 3' 4' 5'$ wird weder merkliche Verbesserung noch merkliche Verschlechterung bewirken.

Fig. 31.



2. Was den Fall induktiver Belastung betrifft, so ist zu bedenken, daß auch hier nur der Stromumsetzungsgrad in Frage kommt,

da $\frac{\int_0^\tau i\,dt}{\tau}$ die Erregung bedingt.

Fig. 31 stellt den Fall rein induktiver Belastung dar (für die ideale Zelle). Hier wird sich im Bereich 1 2′ 3 die positive Stromwelle 1 2 3 ausbilden. Im Bereich 3 4 5 wird, wenn die Zelle als unendlich großer Ohmscher Widerstand aufgetaßt werden kann, der Strom $i = 0$ sein (3 4 5); wenn die Zelle als Kapazität zu betrachten ist, sucht sich bei der Generatorspannungskurve 3′ 4 5′ für große Kapazität (gegenüber der Induktion) die Stromkurve 3 4′ 5, für kleine Kapazität (gegenüber der Induktion) die Stromkurve 3 4″ 5 auszubilden. Im letzteren Fall wird der Umsetzungsgrad an und für sich kleiner; im ersteren zerstört der positive Strom die dielektrische Schicht, damit

wiegt die induktive Wirkung über, es sucht sich ein Strom 3 4″ 5 auszubilden, dieser wirkt wieder formierend; kurz, es ist zu vermuten, daß der wirklich entstehende Strom nicht viel über und nicht viel unter der Abszissenachse (vielleicht in Schwingungen bald oberhalb, bald unterhalb) verlaufen wird (labiler Zustand). Es ist also auch hier kein günstigerer Umsetzungsgrad zu erwarten als bei Belastung mit rein Ohmschem Widerstand.

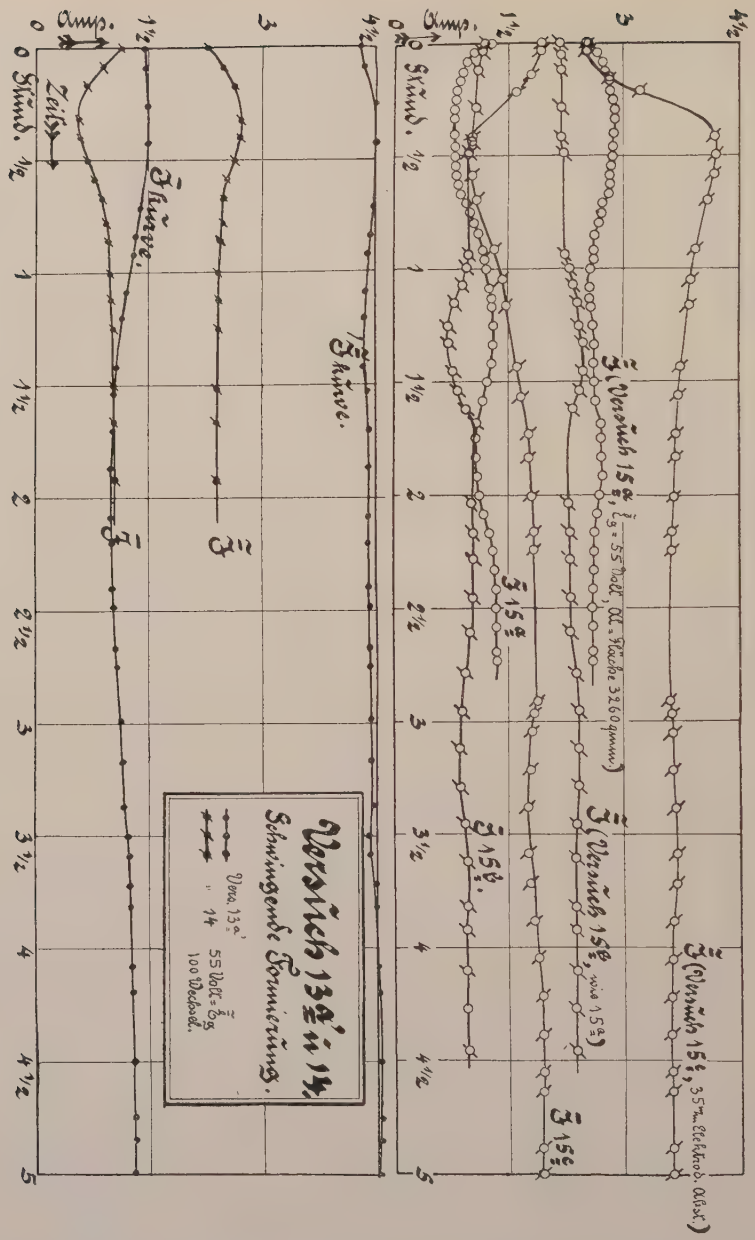
Auch bei Kombination von Ohmschem Widerstand und Selbstinduktion scheint es nicht möglich, eine Verbesserung des Umsetzungsgrades zu erzielen, wie man leicht einsieht. Doch soll darauf nicht weiter eingegangen werden[1]). Nur noch eine Bemerkung über das Verhältnis von Wirkungsgrad und Umsetzungsgrad! In dem durch Fig. 31 dargestellten Fall wäre der Wirkungsgrad = 100 %, da (wie man sieht) die Zelle keine Energie verbrauchte. Trotzdem ist der Umsetzungsgrad klein; man braucht daher eine Wechselstrommaschine von großer Volt-Amperezahl, um eine verhältnismäßig kleine Gleichstromleistung zu erzielen; d. h. wegen des schlechten Umsetzungsgrades müssen größere Typen verwendet werden, die nicht ausgenützt werden können. Dies war nun der denkbar günstigste Fall; wenn im Belastungswiderstand Ohmscher Widerstand enthalten ist und auch der Zellenwiderstand nicht in einem Fall = 0, im andern = ∞ gesetzt werden kann, werden Wirkungsgrad und Umsetzungsgrad schlechter.

e) Schwingende Wechselstromformierung.

Ehe ich nun zur Mitteilung der Versuchsresultate schreite, will ich noch auf eine Erscheinung hinweisen, die wie wenige geeignet ist, Versuchswerte zu fälschen, und wo das umgangen werden soll, dem Experimentator das Arbeiten sauer zu machen. Es ist dies die Erscheinung der schwingenden Formierung, die sehr häufig auftrat und in der graphischen Darstellung XXIV zur Anschauung gebracht werden soll[2]). Die Erscheinung besteht darin, daß im Betrieb unvermutet $\tilde{J}$ ansteigt und $\overline{J}$ sinkt und zwar ganz allmählich im Verlauf von Stunden, oft vielen Stunden, nicht etwa um einige wenige Prozente, sondern bis 100 und mehr Prozent. Die Erscheinung trat meistens auf

[1]) Die obigen überschlägigen Erörterungen stimmen gut überein mit dem, was E. Cramer in seinen „Untersuchungen über die Pulsation des Gleichstromes bei dem rotierenden Umformer“ E.T.Z. 1903, S. 956, Spalte 2 sagt.

[2]) Die Versuchsbedingungen sind unter der betreffenden in den Kurven angegebenen Versuchsziffer in den Tabellen aufgeführt (Versuche 13, 14, 15).



1. wenn besonders kräftige Gleichstromformierung vorausgegangen war,

2. wenn besonders starke oder langdauernde Beanspruchung der Zelle stattgefunden hatte,

3. wenn in der Wasserkühlung plötzlich starke Aenderungen eingetreten waren.

Das läßt darauf schließen, daß die Formierung des Aluminiums in einem, ich möchte sagen, labilen Zustand sich befindet, d. h. bei dem geringsten äußeren Einfluß unter gewissen Umständen schlecht werden kann bis zu einem schlechtesten Wert, der auch jenseits des stabilen Zustandes liegt. Denn von nun an war zu beobachten, daß die Formierung wieder besser wurde, daß der ursprüngliche oder ein ähnlicher Zustand wieder erreicht wurde, worauf in der Regel die Formierungswelle abklang, eventuell aber auch neu einsetzte. Ich konnte mich leider auf die Untersuchung dieser Erscheinung nicht weiter einlassen, die offenbar wie die Formierung und Entformierung in einer Periode ebensolche Prozesse in langer Zeit widerspiegelt. Beim Aufnehmen der Versuchswerte muß man die Garantie haben, daß man sich nicht gerade in einer Schwingung befindet, was sich nicht allzuschwer durch Kontrolle des zeitlichen Verlaufs von $\overline{J}$ und $\hat{J}$ feststellen läßt. Wenn eine Welle auftritt, so gelingt es mit derselben Elektrode im günstigsten Fall erst nach Stunden mit den Aufnahmen weiterzufahren.

f) Versuchsresultate und Besprechung derselben.

Da ich aus diesem Grund bei der Mitteilung der Versuchswerte zumeist Wert darauf legen mußte, den zeitlichen Verlauf anzugeben, während doch das, was sich in dieser Zeit abspielt, das eigentliche Versuchsmaterial bildet, und da es sich nicht um längere zusammenhängende Zahlenreihen, sondern zumeist um wenige zusammengehörige Punkte handelt (die in längeren Zeiten aufgenommen sind), sah ich mich leider genötigt, hier von graphischer Darstellung abzusehen und das Material in tabellarischer Form zusammenzustellen[1]). Alle nötigen Angaben enthalten die Tabellen selbst; die wichtigen Resultate sind im Text noch eigens zusammengefaßt und besprochen.

Versuche 3: Wirkung kleiner Aluminiumfläche und Spannung, großer zumeist induktiver Belastung.

Die Versuche 3 zeigen die ungünstige Wirkung kleiner Flächen und Spannung, die sich besonders in den ungemein kleinen Umsetzungsgradzahlen ausspricht. Der Grund dafür liegt in der Temperaturerhöhung der Oberfläche selbst schon bei diesen Stromstärken (und dem großen Widerstand). Der Stromumsetzungsgrad α ist dabei nicht schlecht, da wir hier Annäherung an den Wehneltprozeß haben.

[1]) Siehe Anhang.

Bei Spannungserhöhung steigen mit der Formierung alle 3 Umsetzungsgrade (s. S. 76) und die resultierende Kapazität. Die übrigen hier bemerkenswerten Erscheinungen finden wir im folgenden (wo wegen der größeren Werte die Meßgenauigkeit größer ist) wieder und beschreiben sie da. Bei Reihe 3 ist der Hauptwert auf das Studium der Kurvenform (s. graphische Darstellung IX bis XIV und S. 51) gelegt.

Größenordnung der Versuchswerte:

$\tilde{\varphi}_z = 28$ bis 32^0.

$\tilde{R}_z = 23$ bis 35 Ohm (letzteres bei großer Belastung, niederer Spannung $\tilde{E}_g = 18$ Volt).

$\tilde{C}_z = 58$ bis 78 Mfd. bei 100 Wechseln,
150,2 Mfd. bei 50 Wechseln.

$\alpha = 45$ bis 58 % (bei $\tilde{E}_g = 18$, bezw. 35 ½), d. i. etwa 75 % bis 95 % des idealen α.

$\eta_z = 5$ bis 12 ½ %.

$\eta_t = 3\frac{1}{2}$ bis $6\frac{1}{2}$ %, d. i. etwa 10 bis 20 % des idealen η_t.

Versuche 4: Wirkung der Spannungsvergrößerung bei kleiner Fläche.

Versuch 4a, etwa mit 3a in Vergleich zu setzen, zeigt die günstige Wirkung größerer Spannung selbst bei kleiner Fläche in der Erhöhung von η_z.

Es ist $\tilde{\varphi}_z = 17$ bis 21^0,
$\tilde{R}_z = 11$ bis 11 ½ Ohm,
$\tilde{C}_z = 87$ bis 108 Mfd.,
$\alpha = 36$ bis 42 %,
$\eta_z = 13$ bis 15 ½ %.

Wir erkennen ferner den geringen (verschlechternden) Einfluß der Anschaltung der Instrumente der Wellenstromschaltung und den Unterschied zwischen durch Planimetrierung und Wellenstrommessung gefundenen Werten.

Versuch 4b zeigt die Wirkung der Verkleinerung[1]) der Aluminiumoberfläche:

$\tilde{\varphi}_z = 0$ bis 13^0,
$\tilde{R}_z = 15$ bis 17 Ohm,
$\tilde{C}_z = 0$ bis 45 Mfd.,
$\alpha = 42$ bis 44 %,
$\eta_z = 11$ bis 13 %.

[1]) Durch Verschleiß der Aluminiumelektrode.

η_z wird deshalb nicht besser (obwohl α etwas besser wird), weil die Widerstände in beiden Richtungen größer werden.

Versuche 5: Wirkung großer Fläche bei nicht großer Spannung.

Bei Versuch 5a wurde wieder mit kleineren Spannungen, aber mit großer Fläche gearbeitet. Der nun folgende Schematismus, der der Uebersichtlichkeit halber gewählt wurde und immer wiederkehrt (im folgenden), besagt: Wenn $\tilde{E}_g$ größer wird (c. p.), wird $\tilde{C}_z$ größer, α größer etc.

Aus der Zusammenstellung ist die günstige Wirkung der Spannungserhöhung ersichtlich. $\tilde{C}_z$ wird größer wegen der besseren Formierung (und damit auch die Phasenverschiebung). Im folgenden stelle ich noch eigens die Werte (ihrer Größenordnung nach) zusammen:

$\tilde{E}_g$	$>$
$\tilde{R}_z$	$<$
$\tilde{C}_z$	$>$
α	$>$
η_z	$>$

$\tilde{E}_g$	30 Volt	45 Volt
$\tilde{\varphi}_z$	17—26°	27—29°
$\tilde{R}_z$	14—15½ Ω	13—14 Ω
$\tilde{C}_z$	72—100 Mfd.	122—127 Mfd.
α	49½—50½ %	50—52 %
η_z	21—22 %	26—28 %

Versuch 6: Einfluß der Temperatur.

In Versuch 6 folgt eine Untersuchung des Einflusses der Temperatur (bei 60 Volt und 50 Wechsel pro Sekunde).

Man erkennt, wie die Kapazität wegen der Verdünnung der Formierungsschicht bei Temperaturerhöhung ansteigt und der Widerstand fällt. Die Wirkungsgrade nehmen schnell ab.

Temp.	32	40	50	°C.
$\tilde{\varphi}_z$	24° 52′	24° 15′	24° 15′	—
$\tilde{R}_z$	10,55	9,01	7,46	Ohm
$\tilde{C}_z$	284	319	385	Mfd.
α	46,3	41,3	35,1	%
η_z	26,8	23,5	19	%

Versuch 7: Wirkung der Vergrößerung der Fläche.

Versuch 7 (mit größerer Elektrode wie der sonst analoge Versuch 4) erweist die günstige Wirkung größerer Fläche bei diesen durch die Temperaturwirkung so stark beeinflußten Starkstromversuchen (Stromdichte hier ca. $^1/_{800}$ Amp./qmm). Ich mache besonders auf die Erhöhung der Kapazität und damit der Phasenverschiebung (in der folgenden Zusammenstellung) aufmerksam. α und η_z sind hier schon recht günstig, wobei man immer das maximal Erreichbare im Auge behalten möge.

	Versuch Nr. 4 570—480 und weniger qmm Fläche	Versuch Nr. 7 3140 qmm Fläche	Also: Fläche $>$
$\tilde{\varphi}_z$	0—21 °	33—40	$>$
$\tilde{R}_z$	11—17 Ohm	12—13	$<$
$\tilde{C}_z$	108—0 Mfd.	180—200	$>$
α	36—44 %	51,7	$>$
η_z	15 $^1/_2$—11 %	38 $^1/_2$—39 $^1/_2$	$>$

Versuch 8: Wirkung der Spannungserhöhung.

Der Vergleich der Versuche 8a, 8b, 8c zeigt die Wirkung der Spannungserhöhung (bei 50 Wechsel) unter sonst gleichbleibenden Verhältnissen.

Der Schematismus stimmt bis auf $\tilde{R}_z$ mit dem von Versuch 5a überein. $\eta_z = 46{,}1\,\%$ ist schon ein sehr guter Wert.

$\tilde{E}_g$	45 Volt	60 Volt (8a)	75 Volt	$>$
$\tilde{\varphi}_z$	20 °	31	35	$>$
$\tilde{R}_z$	8—8 $^1/_2$ Ohm	11 $^1/_2$—12	12	$>$
$\tilde{C}_z$	269—291 Mfd.	320—340	374	$>$
α	37—40 $^1/_2$ %	52—53	56 $^1/_2$	$>$
η_z	19—22 %	37	46,1	$>$

Versuch 9a: Wirkung stärkerer Vergrößerung der Fläche.

Versuch 9a ist unter denselben Bedingungen wie 8a ausgeführt, nur mit doppeltem Elektrodenabstand und vierfacher Aluminiumfläche.

Die Größenordnung der Werte:

$\tilde{\varphi}_z = 33^0$, $\tilde{R}_z = 13^1/_2$ Ohm, $\tilde{C}_z = 312$ Mfd., $\alpha = 54\,\%$, $\eta_z = 37{,}65\,\%$

zeigt nur eine kleine Verbesserung gegenüber Versuch 8a; eine weitere Vergrößerung der Fläche ist also unrationell.

Versuch 10: Einfluß der Hintereinanderschaltung von zwei Zellen.

Die Versuche 10a, 10b und 10a′ sind mit liegenden Platten von 18000 qmm einseitiger Fläche (Grisson-Anordnung: Al über Pb liegend) ausgeführt (99,5%iges Al).

Für Zelle 1 allein ist $\alpha = 40\,\%$ $\eta_t = 11{,}1\,\%$,
„ „ 1 u. 3 hintereinander $\alpha = 48$ bis $48{,}1\,\%$ $\eta_t = 15{,}1$ bis $15{,}4\,\%$.

Der Wirkungsgrad ist trotz der hohen Generatorspannung (110 Volt) und des geringen Elektrodenabstandes nicht gut, nämlich

η_t = ca. 40% des idealen Wirkungsgrades,
α = ca. 80% „ „ „

bei zwei Zellen hintereinander. Durch das Zuschalten von Zelle 3 zu Zelle 1 war

η_t um ca. 40%,
α um ca. 20%

seines Wertes verbessert worden, trotzdem sich an der Zelle 1 keine hohe Spannung in der Richtung Al-Pb (s. graphische Darstellung XXIII und S. 69 bis 71) einstellt. Die Zelle 3 wirkt als eigentlicher Umformer, die Zelle 1 nur als Pufferzelle, die etwa durch Zelle 3 nicht genügend parierte Spannungsstöße zurückweist.

Versuche 11: Einfluß verschiedener Fläche, Spannung und Wechselzahl bei kleinem Konsumwiderstand.

Es folgen nun die Versuche, für die keine Kurvenaufnahmen mehr vorliegen, zunächst der Versuch 11 ohne andere Belastung als die durch den Widerstand der Meßinstrumente. Dabei ist für die Beurteilung der Meßgenauigkeit von Interesse, wie genau die Werte $\bar{R}_z$ bei allen aufeinanderfolgenden Versuchen mit denselben Meßbereichen der Instrumente übereinstimmen. — Für die Belastung 0 wäre in dem auf S. 79 und 80 behandelten vereinfachten Fall unter Voraussetzung der günstigsten Umwandlung ($i'' = 0$) $e' = -e''$, also

$$\eta_z = \frac{1}{\frac{\pi^2}{4}\,\frac{1}{1-1} - 1} = 0.$$

D. h.: der Umsetzungsgrad muß hier äußerst gering werden.

In der Tat sind die Werte η_z ganz klein, während doch α entsprechend der kleinen Fläche (Annäherung an den Wehnelt-Prozeß wie bei Versuch 3 u. 4) ganz günstig ist.

Versuch 11a zeigt zuerst den Einfluß verschiedener Wechselzahlen (bei 10 Volt). D. h.: höhere Wechselzahl ist ungünstig. Die Kapazität ändert sich ungefähr umgekehrt proportional der Wechselzahl, weil die Formierungszeit der erreichten Formierung etwa proportional ist.

Wechselzahl	66,6	123	>
$\tilde{\varphi}_z$	39°	36	<
$\tilde{R}_z$	22,4 Ω	22,2	—
$\tilde{C}_z$	175 Mfd.	84,6	<
α	39,9 %	39	<
η_z	2,08 %	1,52	<

Trotz höherer Spannung wird nun bei dieser Versuchsreihe η_z zunächst kleiner, weil jetzt $\overline{R}$ auf ca. $^1/_4$ seines bisherigen Wertes (bei den neuen Meßbereichen der Instrumente) herabsinkt[1]). Daher geben eine richtige Spannungsvergleichung nur die Versuche mit 20 und 30 Volt (s. folgendes Schema).

Generatorspannung	>
$\tilde{\varphi}_z$	—
$\tilde{R}_z$	<
$\tilde{C}_z$	>
α	<
η_z	>

11b bringt eine Wiederholung von 11a. Dabei sinkt jetzt mit höherer Spannung auch η_z; die kleine Fläche ist eben bei $4^1/_2$ Amp. überlastet.

Für 30 Volt folgt nun wieder ein Vergleich bei verschiedenen Wechselzahlen mit dem gewohnten Resultat:

---

[1]) Siehe S. 89. $\eta_z = 0$ für $\overline{R} = 0$.

Wechselzahl	60,5	130	>
$\tilde{\varphi}_z$	23°	15	<
$\tilde{R}_z$	8 Ohm	7	<
$\tilde{C}_z$	272 Mfd.	93	<
α	46 %	44	<
η_z	1,3 %	1,2	<

Für größere Fläche (Versuch 11c) wird der Umsetzungsgrad η_z bedeutend größer, nämlich ca. 5 bis 5½ %.

Auch hier sinkt mit höherer Spannung η_z wegen der Verringerung von $\bar{R}$ bei Aenderung des Meßbereichs.

Die Kapazität ist hier sehr groß. Bei 100 Wechsel

$$\tilde{C}_z = \begin{matrix} 209 \text{ Mfd. für } 10 \text{ Volt Gen.-Sp.} \\ 457 \quad „ \quad „ \quad 20 \quad „ \quad „ \end{matrix}$$

(eben wegen der großen Fläche). Daher auch besonders große Phasenverschiebungen (37 bis 45°). $\tilde{R}$ wird mit zunehmender Spannung (wachsender Kapazität) kleiner (15 bezw. 5 Ohm).

Fläche	>
$\tilde{\varphi}_z$	>
$\tilde{R}_z$	>
$\tilde{C}_z$	>
α	>; bei höherer Spannung <
η_z	>

(ganz wie Vergleich von Versuch 4 und 7)

Versuche 12: Vergleich von $NaHCO_3$- und Mg.-citr.-Lösung und von stehenden und (nach Grisson-Walter) liegenden Platten.

Die Versuche 12 bringen einen Vergleich von liegenden und stehenden Platten (nach Grisson-Walter) in $NaHCO_3$- und Mg.-citr.-Lösung. Grisson-Walter glauben, daß die Wirkungsweise der Platten durch aufsteigende Gasblasen (die das Aluminium schützen sollen) wesentlich verbessert wird. Ich muß daran zweifeln, weil ich

überzeugt bin, daß die Gasblasen nur eine sehr untergeordnete Rolle spielen gegenüber der Oxydschicht. Wo ein Partialdurchbruch des Stromes (Funken) erfolgt ist, schließt sich die Pore viel besser durch die oxydierende Stromwirkung als dadurch, daß man durch eine Gasblase dem Strom den Weg versperrt.

Bei meinen Versuchen konnte ich auch in der Tat nie eine besonders günstige Wirkung des Grisson-Gleichrichters bemerken; allerdings arbeitet er zumeist auch nicht schlechter als andere Gleichrichter.

	Stehende Platten (Abst. 90—100 mm) in $NaHCO_3$-Lösung	Liegende Platten (Abst. 25—30 mm) in $NaHCO_3$-Lösung	Stehende Platten (Abst. 90—100 mm) in Mg.-citr.-Lösung
ϑ_z	22—24°	23°	0°
R_z	18—19 Ohm	14	22
C_z	70—75 Mfd.	96	0
α	58 %	54	33—31
η_z	41 %	44 %	5,6 %
η_t	25 %	22 %	4—4½ %

Die Wirkungsgrade für $NaHCO_3$-Lösung sind hier recht gut. Es ist für stehende Platten

$$\alpha = \text{ca. } 97\,\%, \quad \eta_t \text{ über } 70\,\%,$$

für liegende Platten (bei kleinerem Abstand)

$$\alpha = \text{ca. } 90\,\%, \quad \eta_t = \text{ca. } 65\,\%$$

des idealen Wertes. Nur η_z ist beim Grisson-Gleichrichter hier besser. D. h.: das Verhältnis vom positiven zum negativen Strom ist beim Grisson-Gleichrichter schlechter ($\alpha <$), das von negativer zu positiver Spannung dagegen soviel besser, daß sogar η_z besser wird. Wir haben S. 80 schon Gelegenheit gehabt, auf den Einfluß des Spannungsverhältnisses hinzuweisen für den Fall, daß α seinen Idealwert annimmt. Erst $\alpha = \frac{J}{\grave{J}}$ und $\beta = \frac{E}{\grave{E}}$ gibt einen richtigen Anhaltspunkt für die Beurteilung eines Gleichrichters. Ich habe in dieser Abhandlung auf die Aufstellung des Verhältnisses β verzichten können, weil ich noch zwei andere Wirkungsgrade mitführe.

Die Verbesserung des Spannungsverhältnisses im vorliegenden Fall ist darauf zurückzuführen, daß bei der geringeren Platten-

entfernung die Spannung Pb-Al geringer wird, während die Spannung Al-Pb bleibt. Der Grisson-Gleichrichter arbeitet nach dieser Erfahrung also eher schlechter als besser.

Die Mg.-citr.-Lösung aber wirkt offenbar ganz schlecht (wenigstens in der von mir gewählten, S. 2 Fußnote 1 beschriebenen Form).

Versuche 13: Wirkung hoher Spannung und kleiner Wechselzahl bei großer Fläche und kleiner Elektrodenentfernung. — Vergleich von $NaHCO_3$- und Mg.-citr.-Lösung.

Aus Versuch 13 erkennt man die Wirkung großer Spannung und kleiner Wechselzahl (110 Volt und 50 Wechsel) bei großer Fläche und geringem Abstand (18000 qmm einseitig und 10 mm). Dabei sind vor allem die absoluten Werte der Umsetzungsgrade bemerkenswert, die bei der besten Platte am 23. Oktober in 5stündigem Betrieb gegen 3^h Nachmittags auf

$$\alpha = 58{,}2, \quad \text{d. i. } 97\,\%,$$
$$\eta_z = 60, \quad \text{d. i. } 60\,\%,$$
$$\eta_t = 28{,}3, \quad \text{d. i. } 80\,\%$$

des idealen Wertes stiegen. Diese Umsetzungsgrade konnte ich nicht mehr wesentlich überbieten.

Hohe Spannung, kleine Wechselzahl, geringer Abstand, große Fläche sind also äußerst günstig. Die Gesamtstromdichte an der Aluminiumoberfläche war hier ca. $^1/_{3500}$ Amp./qmm.

Auch bei diesen Versuchsverhältnissen konnte mit Mg.-citr.-Lösung keine brauchbare Wirkung erreicht werden, wie aus der folgenden Zusammenstellung sich ergibt:

	$NaHCO_3$-Lösung	Mg.-citr.-Lösung
$\tilde{\varphi}_z$	36—39°	8
$\tilde{R}_z$	17—19 Ω	13
$\tilde{C}_z$	267—281 Mfd.	71
α	57,3—58,2 %	23—29,2
η_z	58,2—60 %	5,8—10,1
η_t	26,8—28,3 %	2,88—5

Versuche 14: Einfluß von Wechselzahl und Spannung und Wirkung der Verkleinerung der Aluminiumfläche.

Versuch 14 zeigt wiederum den Einfluß von Wechselzahl und

Spannung bei etwa $\frac{1}{10}$ der Fläche von Versuch 13 mit dem gewohnten Resultat:

	Wechselzahl > (ungünstig)	Spannung > (günstig)
$\tilde{\varphi}_z$	<	>
$\tilde{R}_z$	<	<
$\tilde{C}_z$	<	>
α	<	>
η_z	<	>
η_t	<	>

Die Absolutwerte der Umsetzungsgrade sind gegenüber Versuch 13 kleiner, offenbar wegen der geringeren Fläche. Daß die Fläche einer Strombelastung mit 5,9 Amp., also $\frac{5{,}9}{1960} = \frac{1}{330}$ Amp./qmm [1]) nicht gewachsen ist, folgt auch daraus, daß unter diesen Verhältnissen $2^{h\,57}$ bis $3^{h\,16}$ während des Versuchs unter schwacher Leuchterscheinung der Umsetzungsgrad (s. Tabelle, Anhang) sank.

Größenordnung der hauptsächlichsten Werte:

	55 Volt		110 Volt
	50 Wechsel	100 Wechsel	75 Wechsel
$\tilde{\varphi}_z$	26—27°	21—23	26—27
$\tilde{R}_z$	14—15 Ohm	13	12½
$\tilde{C}_z$	197—224 Mfd.	90—103	169
α	42½—46½ %	39½—44	50
η_z	23½—27½ %	20½—25½	35
η_t	12½—15½ %	10½—14	17,7

Versuche 15: Einfluß der Spannung, Fläche und des Abstandes bei besonders eisenfreiem und gut formiertem Aluminiumstift.

Die Versuche 15 sind mit einem Aluminiumstift ausgeführt, der besonders eisenfrei und durch gleichmäßige Formierung ausgezeichnet

[1]) Siehe S. 4. Angabe von Pollak und Blondin, die bei (zwischen Versuch 13 und 14 liegenden Werten, nämlich) 42 Wechs./Sek., 110 Volt und $^1/_{1000}$ Amp./qmm günstige Resultate erzielt haben.

war. Die Wirkungsgradwerte sind hier größer als bei Versuch 14, aber immer noch kleiner als bei Versuch 13. Die günstigste Aluminiumfläche ist hier (wegen der guten Formierung und des geringen Temperatureinflusses) kleiner als bei Versuch 14 (unter gleichen Verhältnissen), so daß hier mit kleiner werdender Fläche die Umsetzungsgrade steigen. Die Wirkung der Veränderung des Abstandes läßt sich wie bei Versuch 12 (S. 92) aus der Verbesserung des Spannungsverhältnisses bei geringerem Abstand (gleichbleibenden Stromverhältnis!) erklären.

	Spannung >	Fläche >	Abstand >	Fläche 3260 qmm		Fläche 1380 qmm	
				55 Volt	110 Volt	55 Volt	110 Volt
$\tilde{\varphi}_z$	> <	—	—	23½—29½	28—31	33½	29—32
$\tilde{R}_z$	<	<	—	16½—18	17—18	23½	20
$\tilde{C}_z$	> (bei höherer Spannung <)	>	—	104—145	134—145	121	117—133
α	>	<	=	51—53½	56—57	55	58½—59½
η_z	>	<	<	27—30½	43½—47	31½	43½—46
η_t	>	<	=	17—19	23—25	20	24½—26

Versuche 16: Einfluß der Variation von Fläche, Abstand, Spannung und Wechselzahl.

Es folgt nunmehr die längste Versuchsreihe (Nr. 16), die in sechs aufeinanderfolgenden Tagen aufgenommen wurde und alle bisher erörterten Variationen der Fläche, des Abstands, der Spannung und Wechselzahl vereinigt. Die Versuche stimmen so gut überein, daß es genügen dürfte, die Schemata der Resultate hier zusammenzustellen.

	Wechselzahl >	Fläche >	Abstand >	Spannung >
$\tilde{R}_z$	<	<	—	<
$\tilde{C}_z$	<	>	—	> (bei höherer Spannung und Temp. von 80 Volt, 22° C. an <)
α	<	<	<	>
η_z	<	<	<	>
η_t	<	<	<	>

Die maximalen Umsetzungsgrade waren hier

$$\alpha = 55\,\% = \text{über } 90\,\%$$

des idealen Wertes,

$$\eta_z = 35{,}1\,\%,$$
$$\eta_t = 19{,}8\,\% = 55\,\%$$

des idealen Wertes.

Diese Versuche sind mit derselben guten Aluminiumplatte ausgeführt wie die Versuche 13. Hier kommt nur deshalb kein so günstiger Wirkungsgrad vor, weil der günstigste Fall (110 Volt, 10 mm Abstand, 50 Wechsel, 18000 qmm) hier nicht eingestellt wurde, während Versuch 13 gerade dem Studium dieses günstigsten Falls gewidmet war.

Bemerkenswert ist das Verhalten der Umsetzungsgrade bei Veränderung von Fläche und Abstand. Bei größerer Fläche wurden auch hier alle Umsetzungsgrade schlechter, d. h. wir haben die Grenze rationeller Vergrößerung der Fläche bereits überschritten (bei $^1/_{1500}$ Amp. qmm [größte Stromdichte] günstigste Wirkung). Bei größerem Abstand werden hier ebenfalls alle Umsetzungsgrade kleiner; es handelt sich um sehr große Differenzen im Abstand; bei Vergrößerung desselben wird der Strom Al-Pb nicht kleiner und der Strom Pb-Al kleiner, also α kleiner, während bei kleinen Abstandsänderungen, wie in Versuch 15, α sich nicht merklich ändert. Ebenso werden Widerstandsverhältnis und Spannungsverhältnis (wie mehrfach erwähnt) ungünstig, und also auch η_z kleiner. Damit wird selbstverständlich auch η_t kleiner.

Versuche 17: Wiederholung verschiedener Variationen der Versuchsbedingungen.

Bei Versuch 17 wurden mit einer dünnen Platte [1]) (Fläche 8400 qmm) bessere Resultate erzielt. Das folgende Schema bietet nichts Neues:

	Spannung $>$	Wechselzahl $>$
$\tilde{R}_z$	$<$	$<$
$\tilde{C}_z$	$>$	$<$
α	$>$	$<$
η_z	$>$	$<$
η_t	$>$	$<$

[1]) Es schienen überhaupt die dünnen Platten besser wirksam als die dicken, wenn dies nicht daher kam, daß die dünnen Platten besseres Aluminium enthielten, was nicht kontrolliert werden konnte.

$\alpha_{max} = 58{,}6\,\% = \text{ca. } 97\,^1/_2\,\%$

des idealen Wertes bei 80 Volt und 50 Wechsel, Gesamtstromdichte $= {}^1/_{2000}$ Amp./qmm.,

$\eta_{z\,max} = 38{,}9\,\%$,

$\eta_t = 23{,}1\,\% = 58\,\%$

des idealen Wertes. Bei 110 Volt brannte diese dünne Platte (0,25 mm stark) im Betrieb bald durch.

Versuche 18: Wiederholung verschiedener Variationen der Versuchsbedingungen.

Die längere Versuchsreihe 18 enthält wieder alle Variationen, die überhaupt vorgenommen wurden; das verwendete Aluminiumblech war noch dünner (0,1 mm). Die Resultate sind wieder schematisch zusammengestellt.

	Wechselzahl >	Spannung >	Fläche >	Abstand >
$\tilde{R}_z$	<	<	<	>
$\tilde{C}_z$	<	>	>	<
α	<	>	<	=
η_z	<	>	>	<
η_t	<	>	>	<

$\alpha_{max} = 60{,}45\,\%$ $\eta_z = 50{,}9\,\%$. $\eta_t = 29{,}05\,\%$

$= 100\,\%$ des idealen α. $=$ über $80\,\%$ des idealen η_t.

Bemerkenswert ist, daß hier mit größerer Fläche der Wirkungsgrad besser wurde, daß also die Gesamtstromdichte von $\frac{1}{1000}$ Amp./qmm bei dieser dünnen Platte schon zu groß war. Der von Pollak und Blondin (a. a. O.) angegebene Wert von $\frac{1}{1000}$ Amp./qmm scheint in der Tat ein günstiger Mittelwert zu sein.

Versuche 19: Wiederholung verschiedener Variationen der Versuchsbedingungen mit 99,5%igem Aluminium.

Versuch 19 bringt einige gute Resultate, die mit reinem Aluminium erzielt wurden. Auch hier ist größere Fläche günstig $\left(\frac{1}{3500}\right.$ Amp./qmm, bezw. $\frac{1}{7000}$ günstiger als $\frac{1}{750}$, bezw. $\left.\frac{1}{1500}\right)$.

	Spannung >	Fläche >
$\check{R}_z$	—	<
$\check{C}_z$	>	>
α	>	<
η_z	>	>
η_t	>	>

Die Maximalwirkungsgrade sind:

$$\alpha = 59{,}5\,\% = 97\,\%$$

des idealen Wertes (bei 80 Volt, 18000 qmm, $\frac{1}{5000}$ Amp./qmm, 15 mm Abstand, 65 Wechsel),

$$\eta_z = 58{,}9\,\%$$

(bei 110 Volt, $\frac{1}{3500}$ Amp./qmm, sonst wie α),

$$\eta_t = 27{,}4\,\% = \text{ca. } 80\,\%$$

des idealen Wertes (wie α).

Schlußbemerkung: Gesamtresultat.

Aus all diesen Versuchen erhalte ich folgendes Gesamtresultat. Günstig sind:

1. Möglichst kleine, aber mit Rücksicht auf Stromdichte und Temperatur nicht zu kleine Fläche,
2. möglichst kleiner Abstand,
3. gute Wasserkühlung,
4. kleine Wechselzahl,
5. große Spannung (nicht zu groß mit Rücksicht auf die unter 1 angeführten Punkte),
6. große Stromdichte (bei nicht zu hoher Temperatur): etwa $\frac{1}{2000}$ Amp./qmm.

Unter den günstigsten Verhältnissen erzielte ich die folgenden Umsetzungsgrade:

$\alpha_{max} = 60\,\%$ absoluter Wert $= 100\,\%$ des idealen Wertes,
$\eta_{z\,max} = 60\,\%$ „ „ $= 60\,\%$ „ „ „
$\eta_t = \text{ca. } 30\,\%$ „ „ $= 80\,\%$ „ „ „

β) Versuche mit einer Aluminiumzelle als Kondensator.

A. Beschreibung der mit dem Kontaktmacher aufgenommenen Kurven.

Im Anschluß an die Gleichrichterversuche mit einer Zelle führe ich einige wenige Versuche an, die ich mit Aluminiumkondensatoren ausgeführt habe (zwei Aluminiumelektroden in $NaHCO_3$-Lösung). Ich habe dabei vollkommen auf die Beobachtung mit Amperemeter, Voltmeter und Wattmeter verzichtet und einzig Kurven bei 100 Wechsel mit dem Kontaktmacher aufgenommen. Dabei war die Zelle mit 8 Ohm bif. Wid. in Serie an den Generator gelegt. Bei der oberhalb der Abszissenachse verlaufenden Hälfte der Stromkurve war stets eine Aluminiumplatte von 188/82 mm = 15400 qmm einseitiger Fläche Anode [1]), bei der unteren Hälfte die andere Aluminiumelektrode [2]). Der Elektrodenabstand war konstant = ca. 60 mm. Im übrigen sind die Charakteristika der Versuche die folgenden:

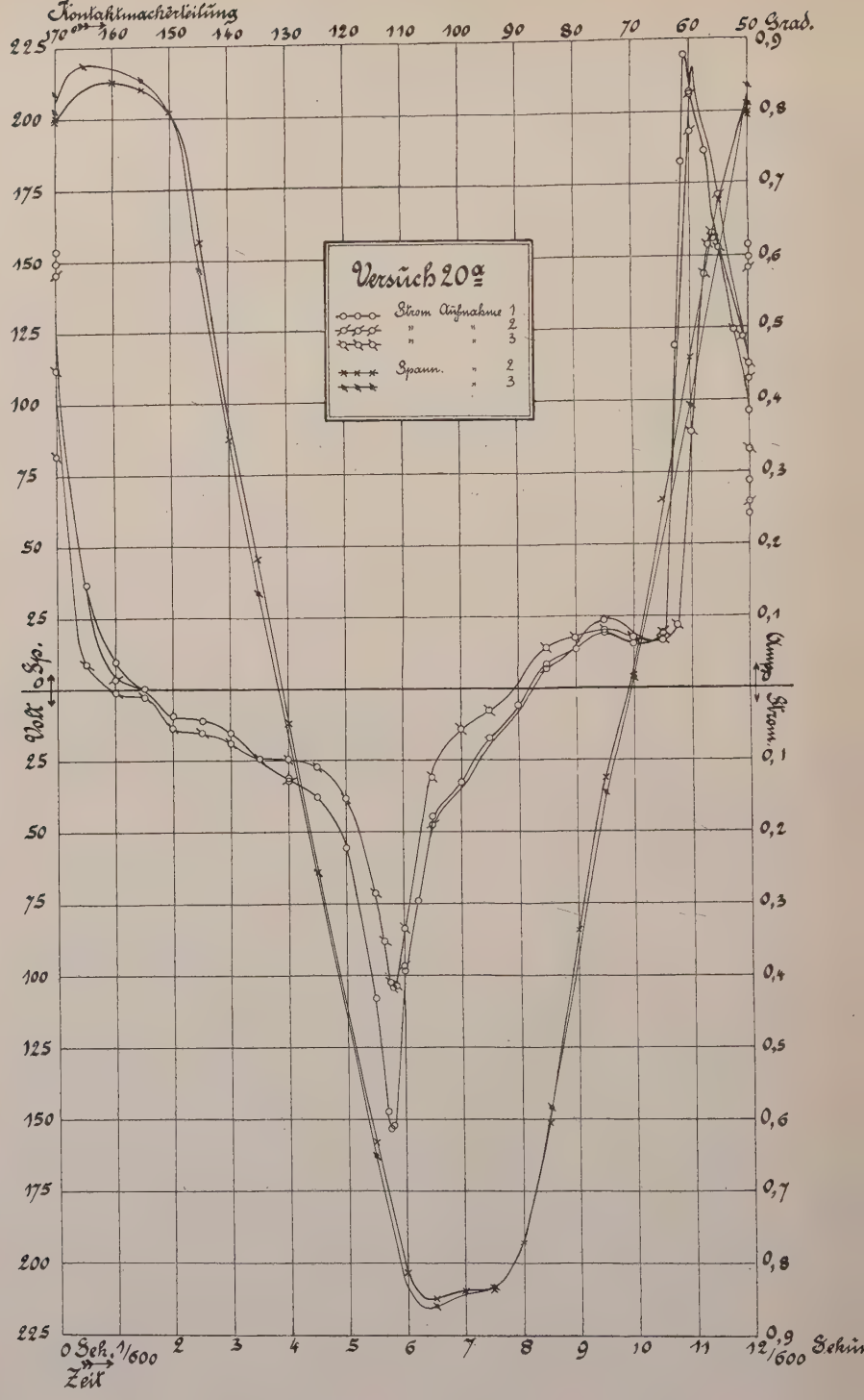
Versuchsnummer	20a u. e	20b	20c	20d
Elektrode 2 (Dimensionen)	5 mm ϕ 125 tief (Stift)	5 mm ϕ 125 tief (Stift)	2 mm ϕ 125 tief (Stift)	155/62½ mm (Platte)
Elektrode 2 (Fläche)	1960 qmm	1960 qmm	790 qmm	9700 qmm
Generatorspannung	153 Volt	206 Volt	260 Volt	153 Volt

Die Versuche 20a, b, c und e (mit Aluminiumstiften als Elektroden 2) sind stark voreilende Spitzenkurven mit den Eigenschaften der Gleichrichterkurven, vor allem den horizontalen Teilen der Stromkurve (s. S. 55 bis 58, Teil II und IV), die auf reine Kondensatorwirkung zurückzuführen sind. Augenscheinlich ist, daß der Strom in Richtung 1, 2 (von Elektrode 1 nach Elektrode 2) immer größere Werte hat als der in Richtung 2, 1; die große Elektrode 1 wirkt also ähnlich wie die Bleiplatte beim Gleichrichter, nur in ganz schwachem Maß. In der oberen Hälfte (s. graphische Darstellung XXV bis XXVII) der Welle ist daher die Stromkurve auch breiter.

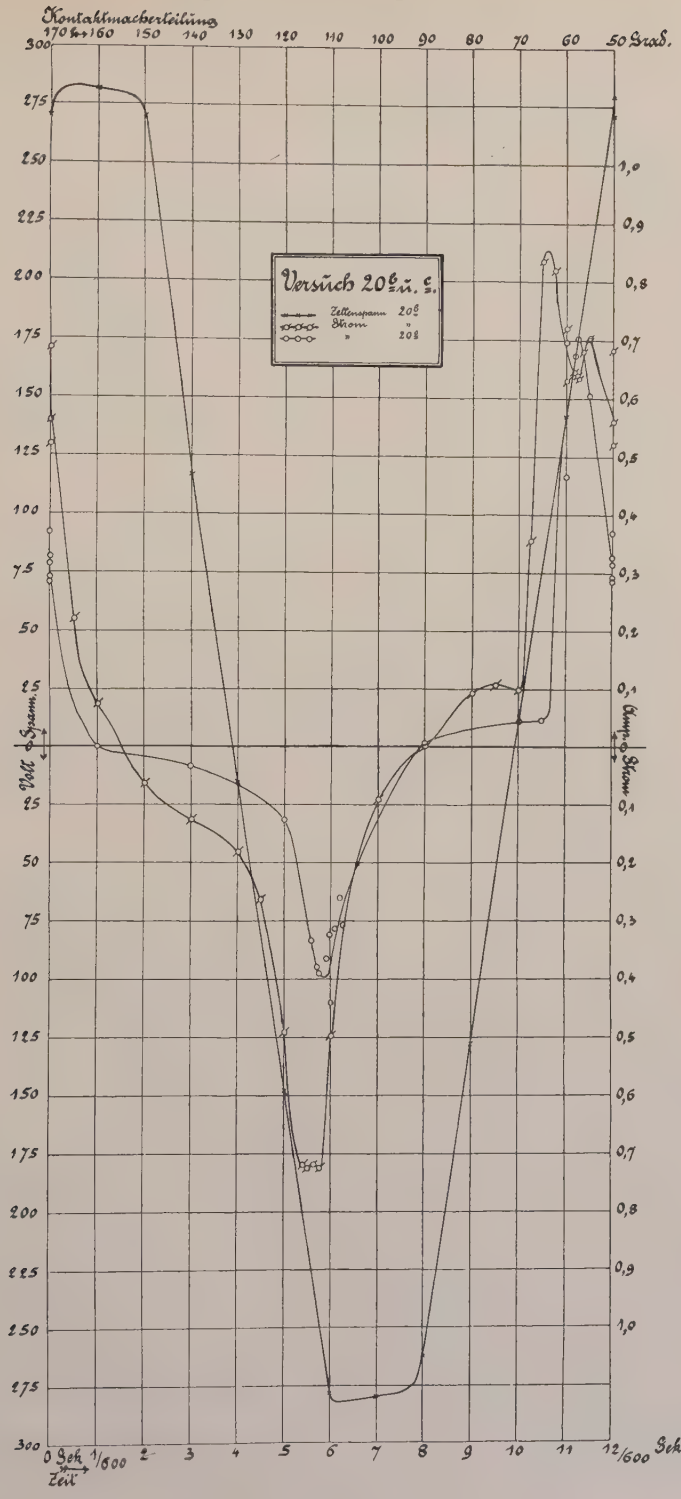
Bei Versuch 20d (mit zwei Aluminiumplatten) verschwindet der Unterschied zwischen Elektrode 1 und 2 fast völlig; die Stromkurve ist symmetrisch zur Abszissenachse. Außerdem ähnelt die Form der

[1]) Im folgenden Elektrode 1 genannt.
[2]) Im folgenden Elektrode 2 genannt.

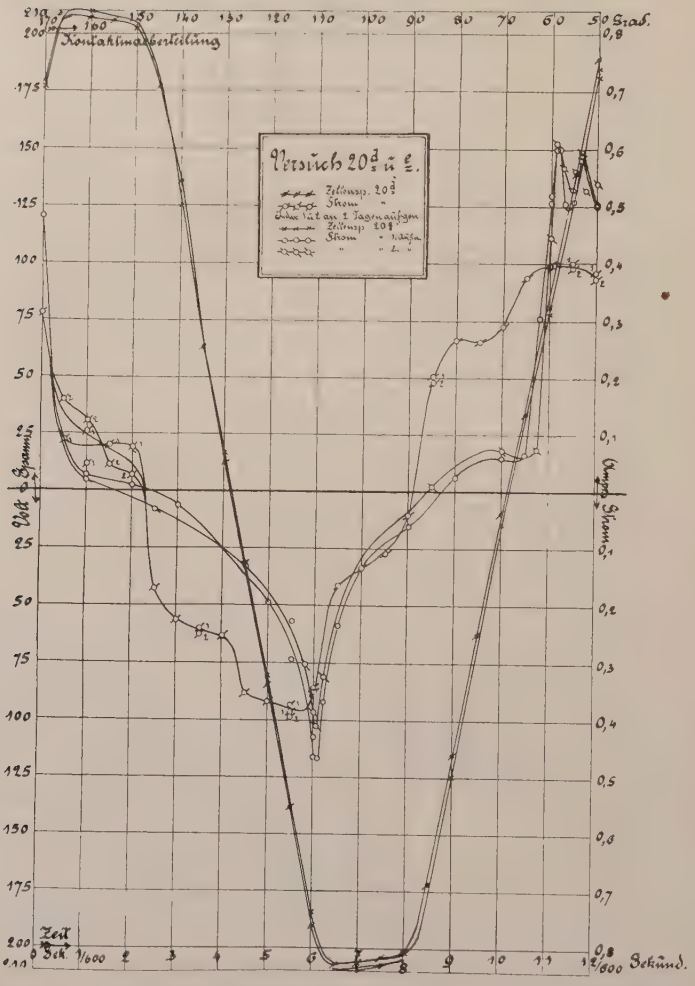
Graphische Darstellung XXV.



Graphische Darstellung XXVI.



Graphische Darstellung XXVII.



Kurve mehr der Sinusform (mit einigen Absätzen entsprechend den horizontalen Stücken der anderen Kurven). Offenbar entfernt sich hier (bei Platten als Elektroden) die Erscheinung von der Wehnelterscheinung (Spitzenkurven), die bei Aluminiumstiften als Elektroden zu Tage tritt, und nähert sich dem Verhalten von gewöhnlichen Plattenkondensatoren. Ferner ist aus den Kurven direkt ersichtlich, daß die Amplituden der Stromkurven nicht nur von der Spannung abhängen, sondern auch wesentlich von der Elektrodenfläche. So ist bei Versuch 20c trotz der großen Spannung von 260 Volt der Strom kleiner wie bei irgend einem anderen Versuche wegen der kleinen Elektrode 2.

B. Die Wellenstromgrößen einiger Versuche (durch Planimetrierung gewonnen).

Für drei Versuche 20b, 20c und 20d habe ich durch Planimetrierung [1]) die Wellenstromgrößen bestimmt und in meine Tabellen aufgenommen (s. die betr. Tabelle des Anhanges).

Wir erkennen daraus, daß so gut wie keine Gleichstromgröße im Stromkreis mehr vorkommt. Der Wert $\frac{\overline{E}_z}{\overline{J}_z} = \overline{R}_z$ ist ganz unbestimmt, da $\overline{E}$ ein Wert von der Größenordnung der vorkommenden Fehler ist. Die Phasenverschiebung ist groß (58 bis 70°), der Ohmsche Wechselstromwiderstand sehr groß (1069 bis 2740 Ohm), und zwar bei der höchsten Spannung $\hat{E}_z = 260$ Volt am größten, weil wir dabei eine Fläche der Elektrode 2 von nur 790 qmm haben. Bei größeren Flächen hängt seine Höhe im wesentlichen von der Spannung [2]) ab, so daß wir bei 150 Volt trotz der großen Elektrode 2 von 9700 qmm (einseitig) einen größeren Widerstand haben (1744 Ohm) als bei 200 Volt und einer Elektrode 2 von 1960 qmm (1069 Ohm).

Die Kapazität hat verhältnismäßig sehr kleine Werte [3]):

2,33 Mfd. bei 260 Volt und 790 qmm (Elektrodenfläche 2),
4,69 „ „ 206 „ „ 1960 „ („ 2),
5,11 „ „ 153 „ „ 9700 „ („ 2).

Der Strom ist bei der größten Spannung wegen der kleinen Elektrodenfläche 2 am geringsten, bei größeren Flächen wächst er mit der Spannung.

Größenordnung von $\tilde{J}_z$ 0,21 bis 0,36 Amp.,
„ „ $\tilde{W}$ 13,4 bis 40 Watt (Wattverbrauch des Kondensators) unter den vorliegenden Verhältnissen.

Es bleibt mir nur noch übrig, zu erwähnen, daß ich hier (wie bei den Gleichstromversuchen) die Erfahrung gemacht habe, daß die Formierung mit der Zeit besser wird, so daß bei ganz bedeutenden Spannungen z. B. der Strom bis ins Unmeßbarkleine sank. Bei weiterer Steigerung der Spannung bis über 300 Volt erhielt ich auch bei Kondensatorzellen schöne Leuchterscheinungen bis zum Abbrennen der kleineren Elektrode in einem Flammenbogen.

---

[1]) Nach der S. 71 u. ff. angegebenen Methode.
[2]) d. h. nimmt mit zunehmender Spannung ab.
[3]) Siehe S. 6 Fußnote 2.

2. Versuche mit vier Zellen.

An diese kurze Betrachtung der Zelle als Kondensator schließt sich als letzter Abschnitt der vorliegenden Arbeit die Untersuchung einer Umformerbatterie von vier Zellen in der Graetz-Pollakschen Schaltung. Es wurde dabei 99,5 % Al enthaltendes reinstes Neuhausener Aluminium und eine Lösung von Natr. bicarb. pur. verwendet. Die Zellen waren mit größter Sorgfalt zusammengesetzt. Die Platten wurden in einer Distanz von 8 mm durch Asbeströhmchen und Gummi (s. Fig. 3, S. 10) gehalten. Die Stromübergangsfläche war genau 140 mm . 110 mm = 15400 qmm.

A. Kurvenaufnahmen.

In erster Linie wurden die auf S. 30 angeführten 12 Kurven mit größter Sorgfalt aufgenommen bezw. berechnet. Die Veränderungen der Versuchsbedingungen waren dabei die folgenden (Wechselzahl konst. = 50):

Versuchsnummer	21a	22a u. b	23a[1])	24a
Gen.-Spann.	110 Volt	55 Volt	55 Volt	110 Volt
Belastung	11,754 Ohm bif.	11,754 Ohm	7,308 Ohm	11,754 Ohm
Bemerkungen	Stehende Platten	Stehende Platten	Stehende Platten	Liegende Platten (Grisson-Walter)

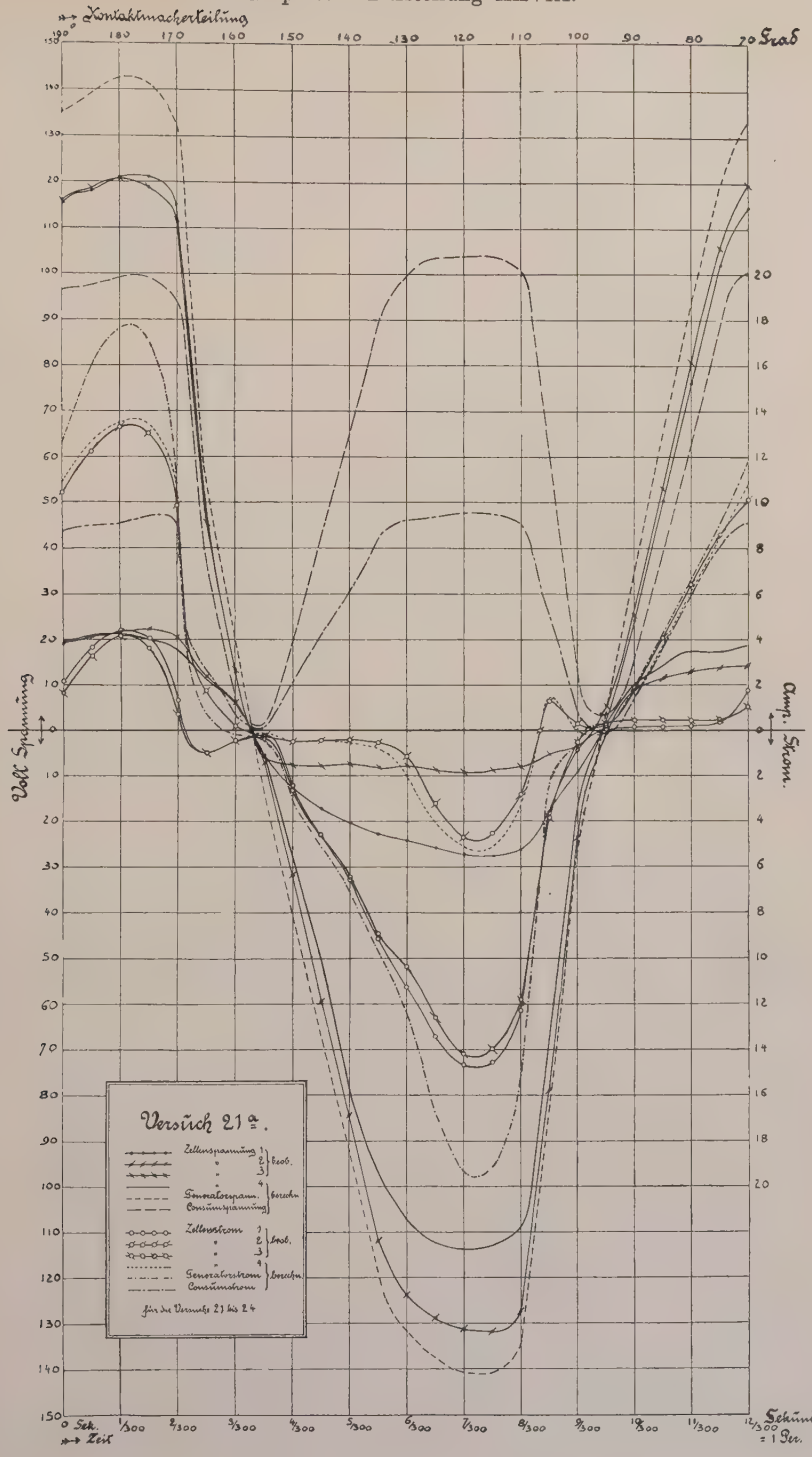
a) Allgemeine Betrachtung der Kurven.

Die Stromkurven der einzelnen Zellen sind die typischen Kurven wie bei den Versuchen mit einer Zelle, nur mit einigen kleinen durch das Zusammenwirken von vier Zellen bedingten Abweichungen. Wir hatten bei einer Zelle zwei horizontale Teile der Stromkurve „II und IV“[2]) wahrgenommen, die ungefähr gleich lang waren und die wir der Kondensatorwirkung der Zelle zuschreiben konnten. Diese horizontalen Stücke treten auch hier auf, nur ist das Stück II viel größer als IV (II abnormal lang, IV abnormal kurz). Ferner war bei der einzelnen Zelle kein wesentlicher Unterschied in den Neigungswinkeln

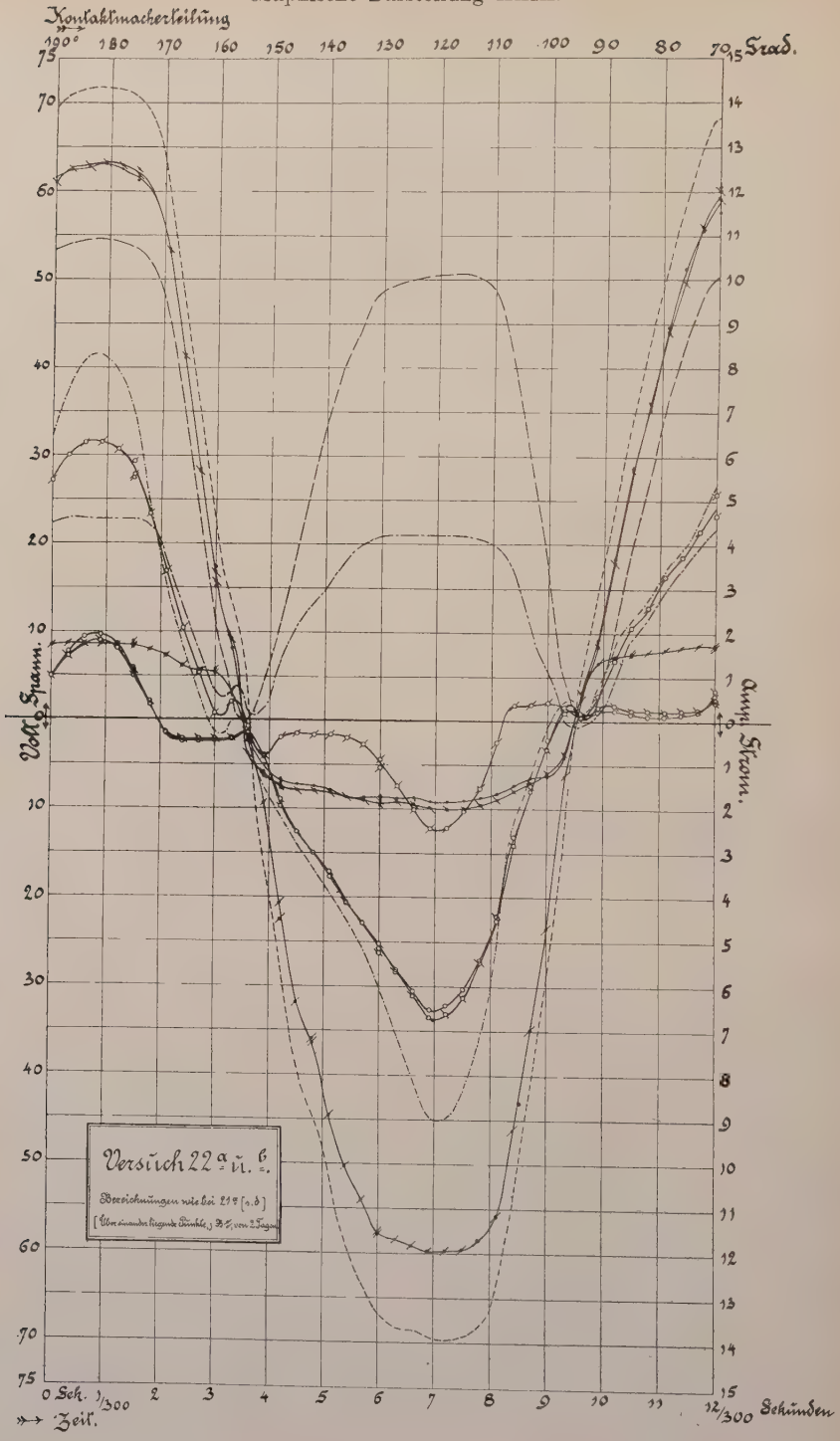
[1]) Bei diesem Versuch wurde nur i- und e-Kurve einer Zelle aufgenommen, alles übrige berechnet unter der Voraussetzung, daß alle Zellen gleich sind und also auch gleiche Kurven geben.

[2]) Siehe S. 55 u. ff.

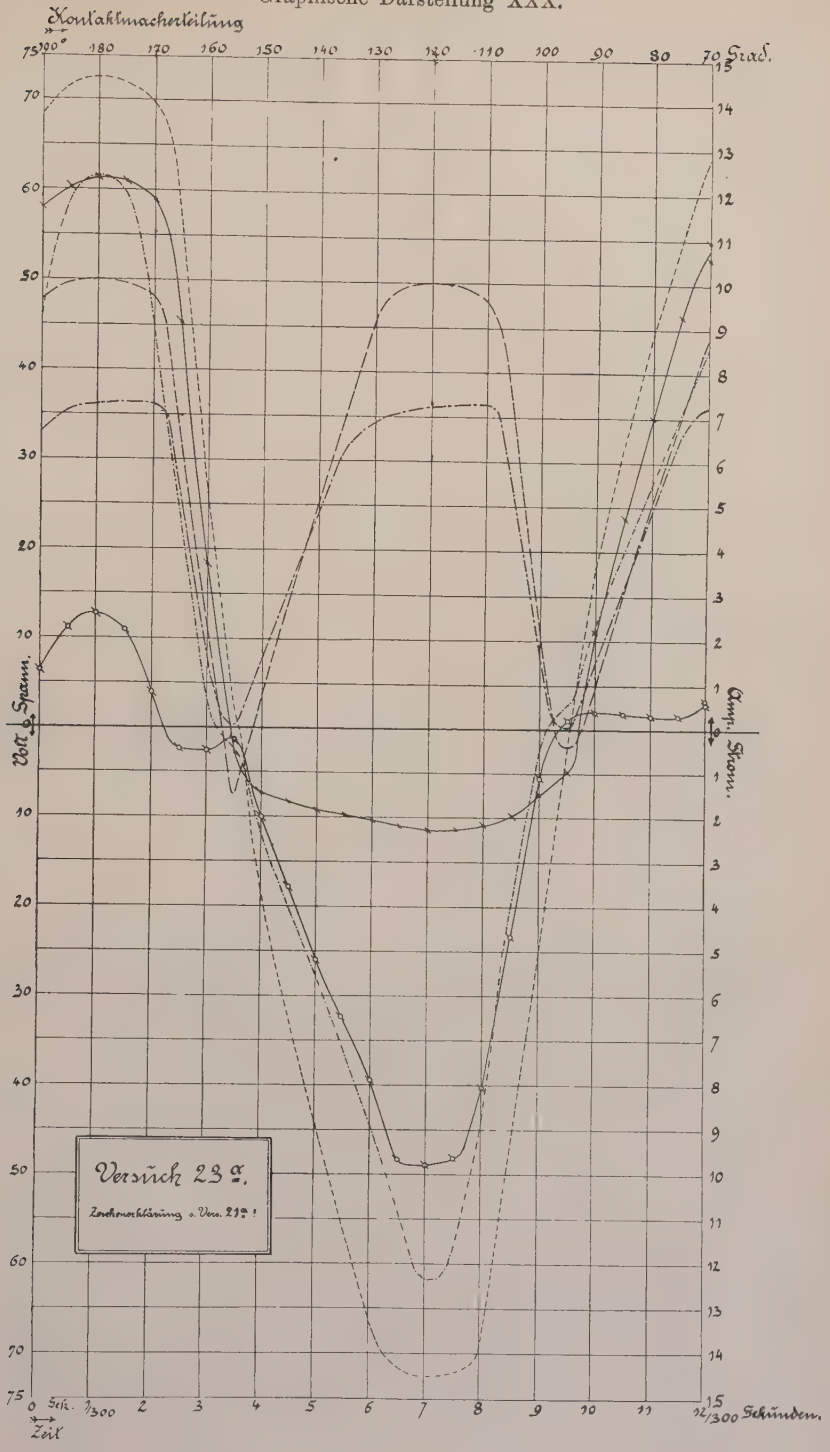
Graphische Darstellung XXVIII.



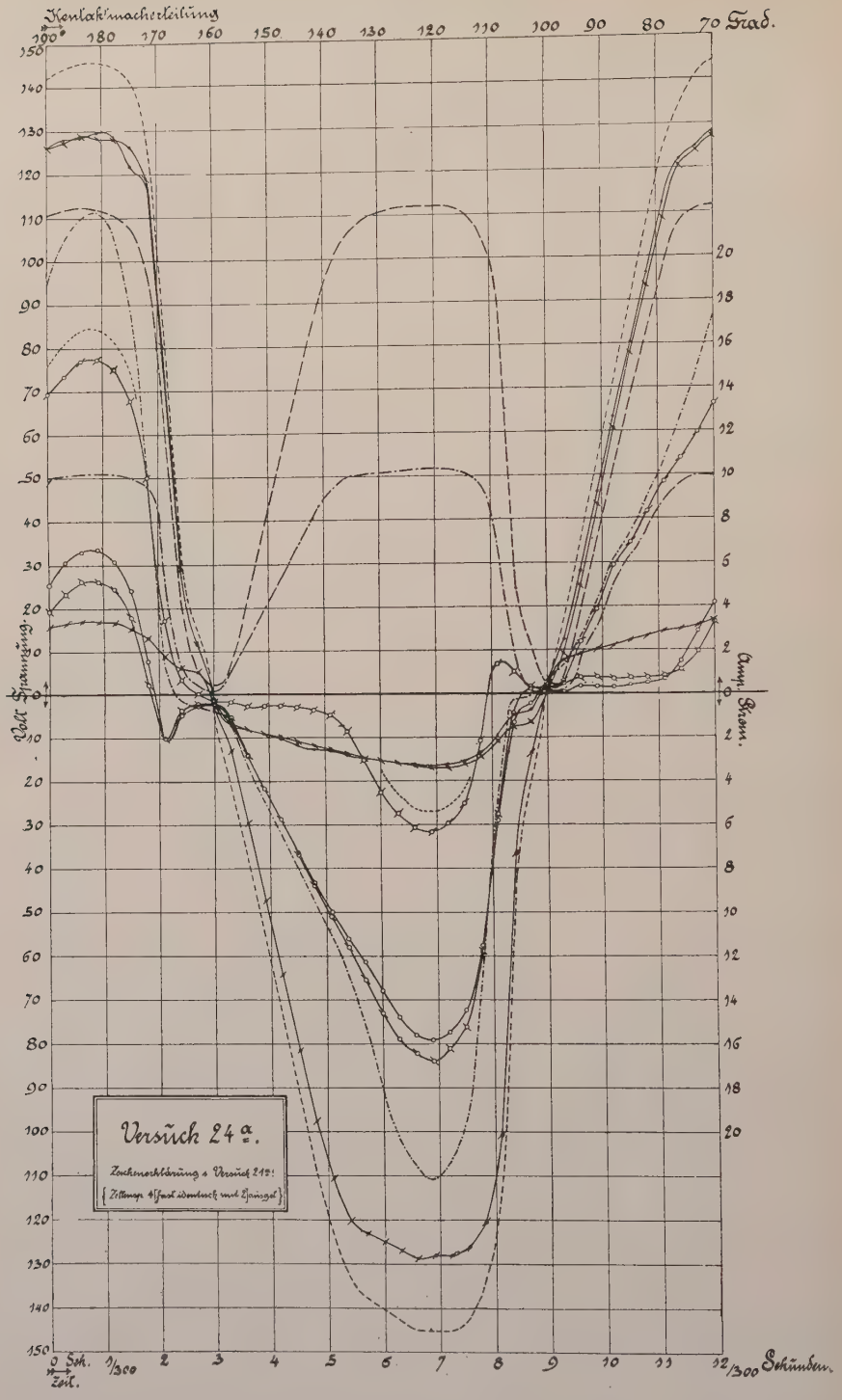
Graphische Darstellung XXIX.



Graphische Darstellung XXX.



Graphische Darstellung XXXI.



der aufsteigenden und absteigenden positiven Stromkurven zu bemerken, hier aber steigt die Kurve allmählich ins Positive und sinkt rapid ab. Es sind durch die Verlängerung des Stromteiles II und durch diese Neigung der Kurve die Maxima zeitlich etwas zurückgeschoben, was Heinke u. a. wohl zu der Vermutung bringen konnte, daß bei derartigen (von Mitkewitsch aufgenommenen) Kurven, die doch als teilweise kapazitive Stromkurven bekannt sind, die Zeit im entgegengesetzten Sinn gezählt sei[1]). Da aber die Spannungskurven ebenso zurückgeschoben erscheinen, wie die von mir aufgenommenen Kurven zeigen, haben wir es faktisch gar nicht mit einer Nacheilung des Stromes zu tun.

Für die oben erwähnten Erscheinungen gebe ich nun zunächst im folgenden den Grund an und zwar an Hand der Fig. 10, S. 29:

Fließt z. B. in Zelle 2 der maximale Strom Pb — Al im Moment des Beginns unserer Betrachtung und sinkt also die Spannung, so sinkt zugleich die Spannung an Zelle 1. Diese Zelle 1 wirkt aber, da hier augenblicklich die Spannung in der Richtung Al-Pb gerichtet ist, als Kondensator, und es entsteht ein kapazitiver Strom $i = c \frac{de}{dt}$, der positiv ist (also in der Richtung Pb — Al fließt), da $\frac{de}{dt} > 0$. Dieser Ladestrom addiert sich zum Generatorstrom und hält so den Strom in Zelle 2 künstlich eine Zeitlang auf der ursprünglichen Höhe, bis dieser endlich rapid absinkt. Sobald er nun aber ins Negative übergegangen ist, beginnt das horizontale Stück II der Stromkurve, wobei die Zelle 2 als reiner Kondensator wirkt. Wenn die Spannung in dieser Richtung größer wird, so preßt sie in erster Linie Strom durch Zelle 1, so daß sich der kapazitive Strom in Zelle 2 lange erhalten kann, bis schließlich der Strom zu einem negativen Maximum ansteigt, um sofort wieder zu sinken. Nun sollte sich ein kleiner positiver Ladestrom eine Zeitlang in Zelle 2 halten. Das ist aber unmöglich, weil Zelle 1 nun diesen Ladestrom aufnimmt, während in Zelle 2 der Strom Pb — Al langsam normal ansteigt. So entsteht die Form der Stromkurven der Zelle, die sich dann auch in den Kurven des Konsumgebiets u. s. w. wieder findet.

Die Konsumkurven werden an ihren Maximalstellen ziemlich flach. Das sieht aus, als ob die entstehenden Kurven von der Form der Sinuskurven abweichend sich der Form der Rechteckskurven näherten, was für den Wirkungsgrad äußerst günstig wäre, da das

[1]) Heinke, Handbuch der Elektrotechnik I, 2, S. 372.

Gleichstromniveau höher würde. Das ist aber ein Trugschluß. Man muß an meinen Kurven nur betrachten, wie diese Abstumpfungen der Sinuskurven entstehen. Man sieht, daß die negativen Ströme (Al — Pb) sich von den positiven (Pb — Al) gerade in den Spitzen subtrahieren, daß die stumpfen Maximalstellen also schon eine Folge schlechter Wirkungsweise sind. Daher darf man sicher sein, daß besondere Flachheit der Kurven gerade einen sehr schlechten Wirkungsgrad bedeutet.

b) Spezielle Betrachtung der Kurven.

Die spezielle Betrachtung der einzelnen Kurven bietet wenig Veranlassung zu Bemerkungen:

Bei Versuch 21a hatte die Zelle 1 aus irgend welchem Grund einen Widerstand von 4 Ohm in Richtung Pb — Al, so daß sich eine große Spannung hier einstellte. Dies äußert sich auch in den später zu behandelnden Umsetzungsgradszahlen. Am nächsten Tag hatte sich die Zelle erholt, so daß der Umsetzungsgrad dann bedeutend besser wurde[1]).

Der Versuch 22a und b mit halber Spannung ist im doppelten Maßstab gezeichnet. Die Werte stimmen in der graphischen Darstellung dann ausgezeichnet mit denen von Versuch 21 überein. Nur treten die Verschiedenheiten gegenüber den Kurven der Versuche mit einer Zelle (die steilen und schrägen Stellen) weniger stark auf, und auch die Stücke II und IV sind nicht so ungleich. Es ist eben c und e kleiner, also auch $\frac{de}{dt}$ kleiner, infolgedessen erst recht c $\frac{de}{dt}$ kleiner.

Der Versuch 24a mit Grisson-Walter-Gleichrichter, bei dem die Zelle 1 gut funktionierte, unterscheidet sich nur wenig von dem Versuch 21a (nur in der positiven Zellenspannung 1 Pb — Al).

Der Versuch 23a mit geringerer Belastung liegt seinen Kurven nach zwischen 21a und 22a und b.

Ich will nicht unterlassen, darauf hinzuweisen, daß der Widerstand Pb — Al bei diesen Versuchen ziemlich groß ist, trotzdem die Elektrodenflächen groß sind und einen Abstand von nur 8 mm haben. Infolgedessen wird der Wattverbrauch pro Zelle bedeutend und der Wirkungsgrad klein. Ich glaube nicht, daß dieser große Widerstand daher rührt, daß sich die Zelle zu langsam entformiert, was wir ja als einen der Gründe für großen Pb — Al-Widerstand kennen gelernt haben.

---

[1]) Die Zelle 1 ist die Zelle, die auch bei dem Versuch mit zwei hintereinandergeschalteten Zellen sich als die schlechtere erwies.

B. Wellenstromuntersuchungen.

a) Behandlung der Versuchsresultate.

Es handelte sich hier hauptsächlich um die Bestimmung des Umsetzungsgrads der Umformung; diese Bestimmungen sind in der betreffenden Tabelle des Anhanges durchgeführt.

Ich verstehe dabei wieder unter η_t das Verhältnis $\frac{\bar{W}_c}{\tilde{W}_g}$, d. h. das Verhältnis der gesamten nutzbaren Gleichstromleistung zu der vom Generator abgegebenen Totalleistung.

Ferner ist auch hier wieder das Stromverhältnis $\alpha = \frac{\bar{J}_c}{\tilde{J}_c}$ aufgestellt. Man erkennt aus den Versuchen sofort, daß $\tilde{W}_g - \bar{W}_c$ schon ein großer Wert ist, d. h. daß sehr viel Leistung in den vier Zellen konsumiert wird. Wenn man durch vier Zellen beide Stromimpulse transformieren kann, so erhält man dafür vierfache Verluste, was wohl zu beachten ist. Daher sind die Bemühungen Mitkewitschs, mit weniger Zellen auszukommen, wohl berechtigt. Es treten auch bei diesen Versuchen Wellen von mehrstündiger Schwingungsdauer auf (schwingende Formierung). Ich gebe daher z. B. bei Versuch 21a Anfangswert, Minimalwert und Endwert in der Tabelle an, bei Versuch 21b Anfangswert und stationären Wert (zugleich Endwert).

Wenn wir nur die stationären Werte berücksichtigen, erhalten wir folgendes Resultat (V. = Volt, Pl. = Platten):

Vers. 21a,	110 V.,	50 Wechsel,	stehende Pl.,	11,754 Ohm,	$\alpha = 86{,}5\,\%$,	$\eta_t = 32{,}2\,\%$
„ 21b,	110 „	50 „	„ „	11,754 „	$\alpha = 86{,}7$ „	$\eta_t = 40{,}5$ „
„ 24a,	110 „	50 „	liegende „	11,754 „	$\alpha = 86{,}8$ „	$\eta_t = 31{,}8$ „
„ 24b,	110 „	50 „	„ „	11,754 „	$\alpha = 85{,}3$ „	$\eta_t = 32{,}4$ „
„ 22a,	55 „	50 „	stehende „	11,754 „	$\alpha = 84{,}3$ „	$\eta_t = 34{,}2$ „
„ 22b,	55 „	50 „	„ „	11,754 „	$\alpha = 85{,}5$ „	$\eta_t = 35$ „
„ 23a,	55 „	50 „	„ „	7,309 „	$\alpha = 87{,}2$ „	$\eta_t = 36{,}1$ „

Wir sehen aus dem Vergleich von Versuch 21 mit 24, daß stehende Platten einen besseren Totalumsetzungsgrad ergeben als liegende, selbst wenn wir einen Mittelwert aus den stationären Werten von 21a und b zu Grunde legen, während doch 21a wegen der schlechten Zelle 1 ausscheiden müßte.

Am Stromverhältnis ändert das Liegen der Platten nichts, wohl aber am inneren Widerstand, der durch die Gasblasen erhöht wird.

Höhere Spannung erweist sich wieder als günstiger wie niedrige,

und ebenso geringere Belastung (also größerer Strom) als günstiger wie hohe Belastung.

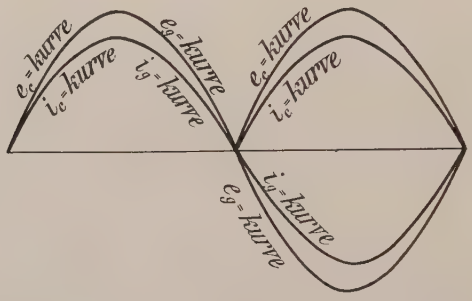
Die besten Werte, die ich im stationären Betrieb erzielte, waren

$$\eta_t = 40{,}5\,\% \text{ (absolut)} \quad \text{und} \quad \alpha = 88{,}5\,\% \text{ (absolut).}$$

b) Vergleich der Umsetzungsgradswerte mit denen einer Umformerbatterie von vier idealen Zellen.

Diese besten erzielten Werte sind natürlich nicht mit dem idealen Umsetzungsgradswert von den Ein-Zellenversuchen in Beziehung zu setzen, sondern es müssen hier vier ideale Zellen zu einer Umformerbatterie vereinigt werden; für diesen idealen Gleichrichter muß dann der Wirkungsgrad bestimmt werden. Zu dem Zwecke lege ich die folgenden Kurven der idealen Vierzellenbatterie zu Grunde:

Fig. 32.



Dabei ergibt sich nun:

$$\bar{J}_c = 2\,i' \int_0^{\pi} \frac{\sin\alpha\,d\alpha}{2\pi} \qquad \bar{J}_g = 0$$

$$\tilde{\bar{J}}_c = i' \sqrt{\frac{2\int_0^{\pi} \sin^2\alpha\,d\alpha}{2\pi}} \qquad \tilde{\bar{J}}_g = \tilde{\bar{J}}_c$$

$$\alpha = \frac{\bar{J}_c}{\tilde{\bar{J}}_c} = \frac{\frac{2}{\pi}}{\sqrt{\frac{1}{2}}} = \frac{0{,}636}{0{,}707} = 90\,\%$$

(ideales Stromverhältnis).

$$\bar{W}_c = 4\,\frac{\left(\int_0^{\pi} \sin\alpha\,d\alpha\right)^2}{(2\pi)^2}\,e'\,i'$$

$$\mathfrak{W}_g = 2 \int_0^{\pi} \frac{\sin^2 \alpha \, d\alpha}{2\pi} e' . i' = \mathfrak{W}_c$$

$$\frac{\mathfrak{W}_c}{\mathfrak{W}_g} = \frac{0{,}404}{0{,}5} = 80{,}8\,\% = \eta_t$$

(idealer Totalumsetzungsgrad).

Es werden also etwa

$$\alpha = 90\,\% \qquad \text{und} \qquad \eta_t = 75\,\%$$

die (bei Berücksichtigung der Kapazität) in Wirklichkeit möglichen idealen Umsetzungsgrade sein, so daß ich bei den obigen Versuchen im günstigsten Fall

$$\alpha = 98\tfrac{1}{2}\,\% \qquad \text{und} \qquad \eta_t = 54\,\%$$

des idealen Wertes erreicht habe.

Ich zweifle nicht, daß man η_t vielleicht auf 70 % (abs.) wird bringen können, wenn mir das auch bei diesen wenigen Versuchen noch nicht gelang, aber unter keiner Bedingung auf mehr als ca. 75 %.

C. Schlußbemerkung.

Es ist uns nun zwar gelungen, die Eigenschaften der Aluminiumelektrolytzellen einigermaßen zu erforschen, die Formierungsvorgänge im Gleich- und Wechselstrombetrieb, die Zusammenhänge von Ohmschem und kapazitivem Strom in einer Periode bei Wechselstrombetrieb und die Umsetzung der Ströme und Leistungen: aber wir stehen vor einem betrübenden Resultat, wenn wir die Aussichten der Aluminiumelektrolytzelle ins Auge fassen. Selbst wenn der Gleichrichter ganz vervollkommnet würde, so scheitert seine Verwendbarkeit in der Praxis [1]) doch an den Eigentümlichkeiten seiner Wirkungsweise, die ihn im idealen Fall nur gerade den Umsetzungsgrad erreichen lassen, den er unbedingt in Wirklichkeit haben müßte, um mit dem rotierenden Umformer konkurrieren zu können. Und diesen idealen Umsetzungsgrad wird er nie bekommen, obwohl das Stromumsetzungsverhältnis α seinem Idealwert außerordentlich nahe kommt, weil das Spannungsverhältnis wegen des inneren Widerstands der Zelle in der Richtung vom Blei zum Aluminium niemals seinen Idealwert erreichen kann.

[1]) Außer als Drosselzelle und Kondensator.

Versuch Nr.	Charakteristika: Dimensionen der Al-elektr.	Fläche (einseitig)	$\overline{E}_g$ ca.	Zeitdauer (Minuten)	$\overline{E}$ Volt I	$\overline{E}$ Volt II	$\overline{E}$ Volt III	$\bar{\bar{E}}$ Volt I	$\bar{\bar{E}}$ Volt II	$\bar{\bar{E}}$ Volt III	$\grave{e}_{max}$ Volt I	$\grave{e}_{max}$ Volt II	$\grave{e}_{max}$ Volt III
1a	Durchmesser 6 mm, Tiefe 36 mm (Stift)	706 qmm (Gesamtfläche)	4	0 bis 10	4,11	4,07	3,99	4,93	5,04	4,92	3,96	4,2	4,0
			8	10 „ 20	8,14	8,21	8,04	9,22	9,39	9,25	6,16	6,4	6,38
			12	20 „ 30	12,22	12,31	12,06	13,39	13,48	13,4	7,62	7,75	7,61
			16	30 „ 40	16,08	15,83	16,0	18,51	18,2	18,4	13,05	12,65	12,8
			20	40 „ 50	20	19,63	19,75	22,3	21,97	22,07	13,87	13,8	13,58
					20,1	—	—	22,34	—	—	13,58	—	—
					20,11	21,57	—	22,49	23,54	—	14,2	13,59	—
			24	50 „ 60	23,9	—	—	25,82	—	—	14,09	—	—
					23,92	24,42	—	26,06	26,22	—	14,76	13,5	—
					23,92		—	25,22		—	14,0		—
					23,93	—	—	25,85	—	—	14,14	—	—
			28	60 „ 70 (bei II bis 65)	28,17	27,9	—	29,73	29,61	—	13,5	14,09	—
					28,05	—	—	29,71	—	—	13,59	—	—
1b α	Blech 54 breit, 110 tief (noch ungebraucht)	5940	4	0 bis 10	4,065	4,035	4,02	4,61	4,56	4,52	3,18	3,03	2,6
					3,8	4,12		4,42	4,67		3,2	3,1	
			8	10 „ 20	8,05	7,91	8,0	8,855	8,67	8,75	5,21	4,98	4,98
			12	20 „ 30	12,07	—	—	12,92	—	—	6,55	—	—
					12,04	12,0	12,06	12,48	12,58	13,06	4,62	5,1	7,07
			14	Nach 30	ca. 14			—	—	—	—	—	—
1b β	27 breit, 110 tief	2970	4	0 bis 10	3,96	3,98	4,19	4,66	4,61	4,83	3,48	3,32	3,38
					3,96		4,28	4,67		4,75	3,48		2,76
			8	10 „ 20	7,92	8,0	8,07	8,72	8,88	8,94	5,15	5,36	5,45
			12	20 „ 30	11,97	12,07	12,17	13,18	13,1	13,1	7,75	6,93	4,7
			$14\frac{1}{2}$	Nach 30	ca. $14\frac{1}{2}$			—	—	—	—	—	—
					I	II		I	II		I	II	
1b γ	27 breit, 53 tief	1430	4	0 bis 10	3,805	4,106		4,45	4,74		3,26	3,35	
			8	10 „ 20	8,255	8,08		9,14	8,97		5,51	5,5	
			12	20 „ 30	12,36	12,105		13,42	13,15		7,49	7,21	
			16	30 „ 40	16,33	15,83		18,07	17,7		10,88	11,3	
					16,43	14,46		18,23	16,14		11,14	9,7	
				Nach 40	—	—		—	—		—	—	
1b δ	50 breit, 13 tief	650	4	0 bis 5	4,06	3,985		4,695	4,62		3,35	3,29	
			8	5 „ 10	8,245	8,102		9,155	9,0		5,66	5,52	
			12	10 „ 15	12,3	12,24		13,36	13,33		7,35	7,49	
			16	15 „ 20	16,07	16,38		17,82	18,16		11,05	11,15	
					16,07	—		17,93	—		11,3	—	
			18	Nach 20	ca. 18			—	—		—	—	
1b ε	20 breit, 18,5 tief	370	4	0 bis 5	4,0	—		4,65	—		3,35	—	
			8	5 „ 10	8,17	8,06		9,06	8,96		5,54	5,5	
			12	10 „ 15	12,21	12,2		13,26	13,24		7,2	7,1	
			16	15 „ 20	16,42	15,9		18,17	17,7		11	11,4	
			20	Nach 20	ca. 20			—	—		—	—	
1b β′	27 breit, 110 tief	2970	4	0 bis 10	4,14	4,03		4,799	4,68		3,465	3,38	
			8	10 „ 20	8,13	7,83		9,01	8,7		5,48	5,41	
			12	20 „ 30	12,39	12,12		13,39	13,18		7,21	7,28	
			16	30 „ 40	—	16,49		—	18,25		—	10,7	
			$16\frac{1}{2}$	Nach 40	ca. $16\frac{1}{2}$			—	—		—	—	
					I	II	III	I	II	III	I	II	III
1c	45 breit, 13 tief	585		0 bis 5	—	5,42 bis	14,5 bis	—	6,3	—	—	—	—
					—	4,37	15	—	6,25	—	—	—	—
			4	5 „ 10	4,06	4,11	4,14	4,75	4,88	4,865	3,46	3,72	3,69
			8	10 „ 15	8,1	8,13	8,14	9,12	9,16	9,15	5,94	6,0	5,97
			12	15 „ 20	12,25	12,23	12,19	13,44	13,35	13,27	7,84	7,5	7,49
			16	20 „ 25	—	15,86	15,92	—	18,02	18,08	—	11,9	12,0
					—	15,86	—	—	18,02	—	—	11,9	—
				Nach 25	—	—	—	—	—	—	—	—	—

Zahlentabellen.

$\overline{J}$ Ampere			$\tilde{J}$ Ampere			i_{max} Ampere			$\overline{R} = \frac{\overline{E}}{\overline{J}}$ Ohm			Bemerkungen		
I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
0,03	0,005	0,01	0,07	0,036	—	0,028	0,051	—	137	814	399	Nach I 5 Min. Pause	Nach II 10 Min. Pause	
0,075	0,035	0,105	0,109	—	—	0,111	—	—	108,5	239	76,5			
0,147	0,08	0,295	—	—	—	—	—	—	83,2	154	40,9			
0,299	0,23	0,65	0,313	—	0,66	0,134	—	0,155	53,8	69	24,6	Elektrodenabstand konst. = ca. 50 mm (bei allen Versuchen). Widerstand in Richtung Pb-Al 1,1 bis 1,2 Ohm		
0,805	0,537	1,1	0,85	0,539	1,12	0,374	0,065	0,283	24,9	36,6	17,95			
0,75	—	—	0,81	—	—	0,435	—	—	26,8	—	—			
0,71	0,636	—	0,79	0,637	—	0,49	0,06	—	28,4	33,8	—			
0,75	0,75	—	0,82	—	—	0,469	—	—	31,9	—	—			
0,65		—	0,78		—	0,594		—	36,8		—			Abschnappen
0,61	0,65	—	0,71	0,69	—	0,51	0,103	—	39,2	32,6	—			
0,575	0,72	—	0,62	—	—	0,32	—	—	41,7	—	—			Säuretemp. ca. 30° C, Al ca. 50 bis 60°
0,675	0,9	—	0,72	0,92	—	0,332	0,265	—	41,7	31	—			
0,815	1,4	—	0,86	—	—	0,395	—	—	34,5	—	—	Abschnappen	Abschnappen	
0,185	0,105		0,204	0,135		0,12	0,118		22	38,4				
0,2	0,1	0,025	0,205	0,192	0,044	0,065	0,23	0,051	19	41,2	161			
0,665	0,89	1,21	—	0,97	—	—	0,55	—	12,1	8,9	6,6			
1,77	—	—	1,81	—	—	0,55	—	—	6,82	—	—	Nach I und II je 10 Min. Pause (d. h. 0 Volt)		
1,46	2,98	3,82	1,87	3,04	—	1,65	0,84	—	8,25	4,03	4,05			
ca. $6\frac{1}{2}$	ca. $7\frac{1}{2}$	über $7\frac{1}{2}$	ca. $6\frac{1}{2}$	ca. $7\frac{1}{2}$	ca. $7\frac{1}{2}$	—	—	—	—	—	—			
0,23	0,028	0,01	—		0,019	—		0,023	17,2	142	419	Vom selben Blech wie bei 1b *a*, desgl. bei allen folgenden Versuchen (neues Blechstück)		
0,18		0,025	0,22	0,029	—	0,127	0,029	—	22		171			
0,7	0,803	1,0	—	0,84	—	—	0,346	—	11,3	9,95	8,07			
2,25	2,72	3,37	—	—	—	—	—	—	5,32	4,43	3,61	Nach I und II je 5 Min. Pause		
über $7\frac{1}{2}$			über $7\frac{1}{2}$			—	—	—	—	—	—			

I	II	I	II	I	II	I	II	I	II
0,2	0,005	—	0,012	—	0,011	19,02	822		
0,14	0,055	0,156	0,058	0,065	0,018	59	147		
0,35	0,42	0,362	0,422	0,134	0,065	35,4	28,5		
1,42	1,18	1,455	—	0,45	—	11,5	13,4		
1,38	1,5	—	—	—	—	11,9	9,65		
über $7\frac{1}{2}$		über $7\frac{1}{2}$		—	—	—	—	Nach I 10 Min. Pause	Al durchgebrannt
0,04	0	0,058	0,022	0,058	0,034	101,5	∞		
0,09	0,03	0,113	0,048	0,097	0,053	91,5	270		
0,205	0,25	0,227	0,266	0,141	0,134	60	49		
0,78	0,925	—	—	—	—	20,6	17,7		
0,775	—	—	—	—	—	20,8	—		
über $7\frac{1}{2}$		über $7\frac{1}{2}$		—	—	—	—	Nach I 5 Min. Pause	Al durchgebrannt
0,02	—	0,022	—	0,006	—	200	—		
0,05	0,03	0,064	—	0,056	—	163,4	270		
0,137	0,15	0,149	0,165	0,077	0,1	89	122		
0,625	0,87	—	—	—	—	26,2	18,3		
über $7\frac{1}{2}$		über $7\frac{1}{2}$		—	—	—	—	Nach I 5 Min. Pause	
0,15	0,005	0,157	—	0,065	—	27,5	725		
0,452	0,45	0,454	—	0,045	—	18,0	17,4		
1,34	1,42	—	—	—	—	9,24	8,5		
—	5,89	—	—	—	—	—	2,8	Abschnappen bei 15 Volt	
über $7\frac{1}{2}$		über $7\frac{1}{2}$		—	—	—	—	Nach I 5 Min. Pause	

I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III	I	II	III
			—	—	—	—	—	—	—	—	—	Vor I, II und III je ein neues Blech. Formierung während der ersten 5 Min. durch:		
ca. 6	0,05	ca. 1												
0,01	0,04	0,0	0,036	0,059	0,007	0,049	0,061	0,011	406	103	∞			
0,06	0,1	0,1	0,08	0,128	0,12	0,075	0,113	0,094	135	81,3	81,4	Strom: von 0 Amp. bis zum Abschnappen variiert	niederen Strom	hohen Strom
0,285	0,26	0,287	0,291	0,277	0,295	0,082	0,134	0,098	43	47	42,5			
—	1,1	1,18	—	1,16	1,96	—	0,51	2,21	—	14,4	13,5			
—	1,1	1,5	—	1,11	1,54	—	0,245	0,48	—	14,4	—			
über $7\frac{1}{2}$			über $7\frac{1}{2}$			—	—	—	—	—	—			

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen: Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\tilde{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand [1]	$\frac{\tilde{J}}{J}$ $\tilde{J}$
3a		6 % $NaHCO_3$	Durchmesser 6 mm, 36 mm tief	680 qmm	60 mm		ca. 18	100	6,871 Ω bif.	0,748 0,306 0,684
3c									0,981 Ω bif. 4,606 Ω ind. 97,5 Mh. 31,98 Ωs	0,426 0,196 0,38
3d							ca. $35\frac{1}{2}$			1,052 0,610 0,86
3e								50	16,88 Ωs, sonst wie ob.	1,411 0,732 1,206
4a		7 %	Durchmesser 5 mm	570 qmm			60	100	8,09 Ω bif.	
4b	10. IV. 2^{45} 4^{15} bis 6^{05} 7^{45}		Wird kleiner. Anfangs: 30 mm tief	480 qmm						
5a	24. IV. 3^{55} 5^{45}	6 %	98 mm breit, 137 mm tief	13400 qmm einseitig	45—120 mm	Ohne Wasser. 25° C am unt. Al-Rand $25\frac{1}{2}$°	30			
5b	10^{05} 12^{25} bis 12^{55}					ca. 250 kg|Stde Kühlwasser. $18\frac{1}{2}$° 22°	45			
6	11^{45} 12^{20} 1^{10}		Durchmesser 8 mm, 90 mm tief	2270 qmm	60 mm	Ohne Kühlung. 32° 40° ca. 50°	60	50		

[1] Diese Rubrik gibt die Belastungen ohne Instrumentwiderstände an.
[2] Diese Rubrik gibt den gesamten Widerstand inkl. Instrumentwiderstände u. dergl. an.

Generator				Zelle					Konsum				$a=\frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$ $\eta_z=\frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t=\frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g}$	Bemerkungen
$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm[2] $\tilde{R}$ Ohm		
18,1	11,6	20^0	41,1		13,8	7,4	$29^0\,15'$	78,1					44,8 %	Aus den Kurven durch Planimetrierung gewonnen
0	0	0,342	0		—2,42	—0,74	0,489	—7,81					9,15	
18,1	11,6	0,94	28,2		13,6	8,1	0,873	22,8		0,74			6,39	
17,8	5,35	$37^0\,50'$			11,2	3,44	$32^0\,15$	57,5					46	desgl.
0,085	0,02	0,614	0,435		—0,835	—0,164	0,5336	—4,25		0,18			4,55	
17,8	5,33	0,789	59,5		11,2	3,6	0,846	34,8					3,38	
35,3	22,7	$41^0\,30$			19,2	13,48	$27^0\,30$	66,1					58	
0,04	0,02	0,663	0,066		—1,75	—1,07	0,462	—2,87		1,09			7,35	
35,3	22,7	0,748	54,9		19,1	14,55	0,887	25,04					4,8	
36,03	34,4	$34^0\,45$			24,47	22,4	$28^0\,15$	150,2					51,9	desgl.
—1,62	—1,185	0,57	—2,22		—4,40	—3,21	0,473	—6		2,03			12,5	
36	35,6	0,821	36,4		24,15	25,6	0,88	22,7					5,9	
				3,56	37	90,5	$21^0\,15$	108					42,1	desgl. ohne Wellenstromschaltung
				1,38	—11,96	—16,5	0,362	—8,69					15,44	
				3,28	35	107	0,932	11,45						
				"3,52	36,8	93,7	$20^0\,45$	105					36,1	desgl. mit Wellenstromschaltung
				1,27	—11,05	—14,05	0,354	—8,7					13,05	
				3,28	35,1	107,75	0,935	11,46						
				"3,52	36,5	92,8	17^0	86,7					38,4	Aus der Wellenstromschaltung bestimmt
				1,35	—11,3	—15,25	0,292	—8,37					14,1	
				3,25	34,8	108	0,956	11,1						
				2,87	40,4	91	0^0	0					41,5	Al wird aufgezehrt
				1,19	— 9,6	—11,4	0	—8,07					11,1	
				2,61	39,2	102,4	1	15						
				"2,77	42,2	86,2	$13^0\,30$	44,9					44,1	
				1,22	—10,2	—12,45	0,233	—8,36					12,7	
				2,48	40,95	98,6	0,972	17						
				"2,61	42,5	87,4	0^0	0					43	
				1,12	— 9,5	—10,6	0	—8,48					10,8	
				2,36	41,4	98	1	17,5						
				1,62	20,5	19	26^0	100,5					50,6	Seit 3^{25} stationär
				0,82	— 6,6	— 5,4	0,438	—8,05					22,2	
				1,4	19,4	24,4	0,899	15,4						
				1,64	19,8	20,1	$17^0\,15$	72					49,4	
				0,81	— 6,6	— 5,35	0,297	—8,15					21	
				1,425	18,7	25,45	0,955	13,75						
				2,72	30,8	41,6	$29^0\,30$	127,5					51,9	Seit 9^{45} stationär
				1,41	—11,6	—16,35	0,492	—8,23					28,2	
				2,33	28,6	57,9	0,87	14,1						
				2,75	30,1	43,5	$26^0\,30$	122					50	
				1,375	—11,5	—15,8	0,446	—8,36					25,6	
				2,39	27,8	59,3	0,894	13						
				3,92	36,8	77	$24^0\,52$	284					46,3	
				1,81	—15,5	—28	0,426	—8,57					26,8	
				3,48	33,3	105	0,907	10,55						
				"4,14	34,1	81	$24^0\,15$	319					41,3	
				1,71	—14,5	—24,8	0,411	—8,49					23,5	
				3,76	30,9	105,8	0,911	9,01						
				"4,36	30,6	84	$24^0\,15$	385					35,1	
				1,53	—12,9	—19,7	0,411	—8,43					19	
				4,09	27,8	103,7	0,911	7,46						

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen								$\frac{\tilde{J}\ \text{Amp}}{\tilde{J}}$
		Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\tilde{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	
7	3^{40} 5^{35} bis 7^{30}	6 % $NaHCO_3$	Durchmesser 8,5 mm, 115 bis 120 mm tief	3140 qmm	60 mm		60	100	8,09 Ω bif.	
8a	4^{45} bis 5^{00} 5^{30} bis 6^{00}							50		
8b							75			
8c	7^{30} 8^{00}						45			
9a			98 mm breit, 137 mm tief	13400 qmm	45 bezw. 120 mm		60			
10a	10^{20} bis 10^{32}	6 %ige $NaHCO_3$-lösung (pur.)	150,120|1 Zelle 1 und 6 hintereinander	18000 qmm	ca. 10 mm		110		11,754 bif.	5,3 2,54
10b	11^{40} bis 12^{30}		Zelle 1 allein							6,0 2,4
10a'	3^{35} bis 4^{40}		wie 10a							5,41 2,6
11a	19. I. 10^{02} bis 10^{28}		Durchmesser 5 mm, 35 mm tief	550 qmm	60 mm	Porzell.-schlange 13,0°	10	123	0	
	10^{15}					13,0°		66,6		
	10^{56}					18,5°	20	100		
	11^{26}					26°	30	100		
	11^{37}					24,5°		60,5		
	11^{48} bis 11^{53}					27,1°		130		
11b	19. I. 3^{46}					12°	10	100	0	
	4^{48}					15,3°	20			
	5^{00}					22°	30			

Generator				Zelle					Konsum				$a = \frac{\overline{J}}{\hat{\tilde{J}}}$ $\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\hat{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\hat{\tilde{W}}_g}$	Bemerkungen
$\hat{\tilde{E}}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{\hat{E}}$	$\hat{\tilde{W}}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{\tilde{W}}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\check{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\check{R}$ Ohm	$\tilde{\hat{J}}$ Amp $\overline{J}$ $\hat{\tilde{J}}$	$\hat{\tilde{E}}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\hat{\tilde{W}}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{\tilde{W}}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\check{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\check{R}$ Ohm	$\hat{\tilde{E}}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{\hat{E}}$	$\hat{\tilde{W}}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{\tilde{W}}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm		
				4,01	38,8	65,2	39° 40	201					51,7	
				2,07	−17,5	−36,2	0,638	−8,45					39,6	
				3,43	34,6	91,4	0,77	13,1						
				¨4,15	39,1	63	33° 15	179,5					51,7	
				2,145	−18,3	−39,2	0,549	−8,53					38,4	
				3,55	34,5	102,2	0,836	11,6						Nach 15 Std. kontrolliert
				3,99	39,55	63,8	31° 30	320					52,7	
				2,1	−18	−37,8	0,522	−8,58					37,2	
				3,39	35,2	101,6	0,853	12,2						
				¨4,05	38,85	64,7	31° 7	340					51,7	
				2,09	−18,05	−37,7	0,517	−8,64					36,8	
				3,48	34,4	102,4	0,856	11,55						
				5,416	49,84	86	31° 50	374					56,3	Aus den Kurven
				3,05	−24,17	−73,5	0,572	−7,93					46,1	durch Planimetrierung
				4,475	43,5	159,5	0,82	11,87						
				3,22	24,5	50,6	20°	291					37	Ziemlich
				1,19	−10,1	−12	0,342	−8,5					19,1	labile Kurve
				2,99	22,35	62,6	0,939	7,97						
				¨3,11	25,3	48	20°	269					40,4	
				1,26	−10,6	−13,35	0,342	−8,42					21,8	
				2,84	23	61,3	0,94	8,62						
				3,87	40,7	62	33° 22	312					54	Aus den Kurven
				2,09	−17,9	37,4	0,550	−8,57					37,65	durch Planimetrierung
				3,26	36,56	99,4	0,835	13,4						
105,2	495,8								61,6	349,9			48	Neuhausener
1									29,5	74,9		11,6		Al 99,5 %. Zelle
105,2													15,1	1 u. 3 in Serie
105,2	605								69,7	433,8			40	Zelle 1 allein
1									27,7	66,5		11,96		
105,2													11,1	
105,2	503,7								62,6	353,4			48,1	Wie 10a
1									29,8	77,5		11,46		
105,2													15,4	
				0,59	9,76	4,22	36°	84,6					39	
				0,23	−0,3	−0,065		−1,3					1,52	
				0,543	9,76	4,28	0,809	22,2						
				¨0,601	9,52	3,97	39° 15	175					39,9	
				0,24	−0,35	−0,084		−1,459					2,08	
				0,55	9,51	4,05	0,775	22,4						
				¨2,39	20,2	39,1	21° 15	119,7					47,3	
				1,13	−0,368	−0,417		−0,326					1,06	
				2,1	20,2	39,52	0,932	10,3						
				¨4,42	27,9	104	17°	131,5					43,4	
				1,96	−0,639	−1,25		−0,326					1,19	
				3,96	27,85	105,25	0,956	7,36						
				¨4,26	28,2	97	22° 40	272					46,2	
				1,97	−0,642	−1,26		−0,326					1,28	
				3,78	28,2	98,26	0,923	8,1						
				¨4,53	28,2	109,3	15° 15	92,8					44,2	
				2,0	−0,652	−1,3		−0,326					1,18	
				4,06	28,2	110,6	0,965	7,2						
				0,532	9,82	3,47	42° 10	104					46,4	
				0,247	−0,36	−0,089		−1,46					2,5	
				0,472	9,76	3,563	0,735	28,2						
				¨2,07	20,56	31,27	26° 15	118					55,6	
				1,15	−0,374	−0,43		−0,325					1,35	
				1,723	20,56	31,7	0,897	13,3						
				¨3,92	29,08	93,38	20° 55	136					46,2	
				1,81	−0,59	−1,07		−0,326					1,13	
				3,48	29,08	49,45	0,934	8,96						

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen: Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\tilde{\tilde{E}}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	$\tilde{\tilde{J}}$ Am $\overline{J}$ $\tilde{J}$
11 c	20. I. 11^{43} 12^{02}	6 %ige $NaHCO_3$-lösung (pur.) Pb 120 m/m 45 m/m Al	26 mm breit, 105 mm tief	2730 qmm	120 mm	15° 19,8°	10 20	100	0	
12 a	29. VII. 10^{50} bis 11^{05}	$6^1/_2$ % Al Pb	60|160|0,3 leicht formiert	9600 qmm	90 bis 100 mm	$2^1/_2$ m Bleikühlschlange	60	100	12,802	2,46 1,42 2,01
12 a'	30. VII. 11^{40} bis 12^{05}									2,51 1,45 2,05
12 b	12^{55} bis 1^{15} (seit 12^{25} stationär)	Grisson-Walter-Anordnung			25 bis 30 mm					2,77 1,49 2,34
12 c	9. VIII. 9^{48} bis 9^{50} 10^{30} bis 10^{42} 11^{05} bis 11^{10}	Mg.-citr. $1^1/_2$ %	Wie bei Versuch 12 a			$1^3/_4$ m Schlange (30 mm vom Al)		65		1,74 0,57 1,74 0,54 1,65 1,75 0,55 1,66
13	23. X. 10^{15} bis 10^{45} 2^{43} bis 3^{00}	$NaHCO_3$ $6^1/_2$ %ig Al Pb Kühlschlange	150|120|0,8	18000 qmm	10 mm		110	50		5,14 2,94 4,21 5,16 3,0 4,2
13'	24. X. 11^{22} bis 11^{27} 5^{52} bis 6^{05}	Mg.-citr. $1^1/_2$ %								4,38 1,01 4,55 1,33 4,35
14	16. X. 4^{45} bis 4^{57} 4^{59} bis 5^{22} 17. X. 10^{40} bis 10^{50} 11^{15} bis 11^{21} 18. X. 2^{15} bis 2^{27} 2^{43} bis 2^{54} 2^{57} bis 3^{16}	$NaHCO_3$ $6^1/_2$ %ig Pb Al Kühlschlange	Durchmesser 5 mm, 125 mm tief Vorher mit Gl.- und W.-Strom formiert	1960 qmm	ca. $7^1/_2$ mm Weniger als $7^1/_2$ mm		55 110	50 100 50 100 50 75	12,802	2,43 1,03 2,2 2,44 1,02 2,40 1,06 2,16 2,37 1,10 2,1 2,41 0,95 2,22 2,37 1,05 2,12 5,87 2,92 5,1

Generator				Zelle					Konsum				$a=\frac{\overline{J}}{\hat{J}}$ $\eta_z=\frac{\overline{W}_z}{\hat{W}_z}$ $\eta_t=\frac{\overline{W}_c}{\hat{W}_g}$	Bemerkungen
$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\hat{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\hat{\varphi}$ sin $\hat{\varphi}$ cos $\hat{\varphi}$	$\hat{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\hat{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm		
				0,982	9,5	5,45	44° 25	209					50,4	11³⁶ Beginn
				0,495	−0,721	−0,313		−1,495					5,54	
				0,885	9,455	5,953	0,712	15,02						
				5,70	19,51	69,19	36° 50	457					57,1	
				3,25	1,059	−3,46		−0,326					4,76	
				4,675	19,46	72,65	0,80	5,2						
59,6	108	26° 30	47,9		39,2	38,2	24°	74,7	32,0	76			57,7	Seit 10³⁰
0,66	0,94	0,446	0,465		−18,1	−25,7	0,407	−12,75	19,1	27,2		13,45	40,3	stationär
59,6	107,1	0,895	33,2		34,8	63,9	0,913	19					25,2	
59,5	113,8	22° 15	41,5		38,5	38,1	21° 30	70,4	32,7	80,2			57,8	Seit 11³⁰
0,6	0,87	0,379	0,414		−18,2	−26,4	0,366	−12,5	19,2	27,8		13,2	41	stationär
59,5	112,9	0,925	31,4		33,9	64,5	0,93	17,8					24,5	
59,6	132,3	19° 30	41,7		35,8	36,6	23°	96,5	36,5	100	10°*		53,9	* Statt 0,
0,62	0,92	0,334	0,416		−19,1	−28,4	0,391	−12,8	19,9	29,6	0,174	13,4	43,7	innerhalb der
59,6	131,3	0,943	27,1		30,2	65	0,920	14,0	30,6	70,4	0,985	13,3	22,4	Meßgenauig-
														keit
59,7	99,5			1,72	37	61,4			22,5	37,8			32,8	Vorher formiert
0,2				0,56	−7,2				7,9	4,5				auf 500 Ω bei
59,7													4,53	100 Volt
59,7	101,8	0°	0	1,72	36,6	61,9	0°	0	22,5	38	0°		31	
0,2	0,1	0	0,37	0,52	−7,1	−3,69	0	−13,7	7,2	3,9	0	13,3	5,6	
59,71	101,7	1,03	36,2	1,64	35,9	65,6	1,12	21,9	21,4	41,9	1,19	13	3,84	
⁻60	102	0°	0	1,72	36,5	62			22,6	38,1			31,4	
0,2	0,1	0	0,364	0,51	−7	−3,6			7,3	4,01			5,48	
60	101,9	1,02	36,2	1,64	35,8	65,6							3,94	
108,5	426	23°	96,8	5,12	69,95	88	35° 45	267	67,1	347,2	0°		57,3	
2,1	6,2	0,391	0,71	2,93	38,1	−111,6	0,584	−13	38,9	114,2	0	13,2	58,2	
108,5	419,8	0,92	28	4,2	58,5	199,6	0,812	17,2	54,6	233	1,01	13	26,8	
108,5	425	23° 15	97,4	5,16	71,9	78,5	39° 22	281	67,5	352,5	0°		58,2	
2,1	6,3	0,395	0,7	3,0	−39,1	−117,1	0,634	−13,0	40	120	0	13,3	60	
108,5	418,7	0,918	28,2	4,2	60,3	195,6	0,773	18,6	54,4	232,5	1,02	13	28,3	
108,5	475,5			4,31	54,5	215			56,4	254			23	Schlechtester
0,7				1,01	−13,2	−13,3			13,5	13,65			5,8	Wert bei 7stün-
108,5						228,3							2,88	digem Betrieb
⁻108,5	480	0°	0	4,47	56,4	204,7	8°	70,7	60	275	0°		29,2	Stationärer
1,1	1,5	0	0,83	1,32	−17,4	−23	0,139	−13,2	18	24	0	13,5	10,1	Wert
108,5	478,5	1,01	25	4,28	53,6	227,7	0,99	12,7	57,3	251	1,01	13,2	5	
54,2	120,1	0°	0	2,40	30	40,5	27° 7	224	34	80			42,5	Al sehr eisen-
0,3	0,31	0	0,29	1,0	−12,5	−12,5	0,456	−12,5	14,5	14,9		14,1	23,6	haltig, un-
54,2	119,8	1	24,6	2,18	27,3	53	0,89	14,1					12,4	formiert
													⁻⁻41,8	
53,9	114	12° 15	27	2,39	30,5	39,9	20° 30	90°	33	77			44,2	
0,3	0,35	0,212	0,28	1,04	−13,1	−13,6	0,35	−12,8	15,1	16		14,2	25,4	
53,9	113,6	0,977	25,6	2,15	26,6	53,5	0,936	13,2					14	
⁻⁻53,9	110,9	11° 15	48,3	2,34	31,3	38	26° 30	207	32,9	76			46,5	
0,3	0,33	0,195	0,27	1,09	−13,3	−14,5	0,446	−12,2	15,5	17,1		14,1	27,6	
53,9	110,6	0,98	26,2	2,07	28,4	52,5	0,895	15,3					15,5	
⁻⁻⁻54,3	121	0°	0	2,4	29	42,9	23°	103	33,7	80,1	9° 45		39,4	
0,3	0,28	0	0,32	0,94	−11,5	−11,1	0,391	−12,2	13,2	12,5	0,169	13,9	20,6	
54,3	120,7	1	24,4	2,21	26,6	54	0,92	13,1	31	67,6	0,985	14,2	10,3	
⁻⁻54,3	113	12°	51,8	2,33	31	39,9	25° 30	197	32,8	76,1			44,4	
0,25	0,26	0,208	0,24	1,02	−12,9	−13,2	0,431	−12,6	15	15,8		14,3	24,8	
54,3	112,7	0,978	26,2	2,09	28,2	53,1	0,903	14,95					14	
⁻108,5	542	13°	44,9	5,81	64,4	165,5	26° 30	169	65	382	0°		49,8	Schwache
1,0	2,9	0,225	0,34	2,88	−30,9	−89	0,446	−10,7	32,9	96	0	11,3	34,9	Leuchterscheinung. Wider-
108,5	539,1	0,974	21,9	5,05	56,5	254,5	0,894	12,5	56,1	288	1	11	17,7	stand und Wir-
														kungsgrad sinken

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen								$\frac{\hat{J}\ Am}{\hat{J}}$
		Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	
15a	18. X. 5^{36} bis 5^{42}	$NaHCO_3$ 6%ig	Durchmesser 7,7 mm, 135 mm tief	3260 qmm	35 mm		55	75	12,802	2,53 1,32 2,16
	5^{46} bis 5^{54}	Pb Al Kühlschlange	Durchmesser 7,3 mm, 75 mm tief	1720 qmm						2,41 1,38
			Durchmesser 7,7 mm, 135 mm tief	3260 qmm						2,53 1,35
	6^{45} bis $51\frac{1}{2}$									2,59 1,35 2,21
	6^{57} bis 7^{05}						80			4,03 2,23 3,4
15b	19. X. 10^{46} bis 11^{09}						110			4,82 2,69 4,0
	11^{13} bis 11^{34}		Durchmesser 7,3 mm, 60 mm tief	1380 qmm						4,53 2,65 3,68
	11^{36} bis 11^{52}						55			2,03 1,1 1,71
	12^{00} bis 12^{08}		Durchmesser 7,7 mm, 135 mm tief	3260 qmm						2,16 1,1 1,86
	6^{37} bis 6^{45}		Durchmesser 7,3 mm, 60 mm tief	1380 qmm						2,09 1,15 1,74
	6^{53} bis 6^{58}						110			4,64 2,76 3,73
	7^{05} bis 7^{11}		Durchmesser 7,7 mm, 135 mm tief	3260 qmm						4,86 2,78 4,0
15c	20. X. 4^{40} bis 4^{50}		Durchmesser 7,5 mm, 125 mm tief	3950 qmm	35 mm		80	75	12,802	3,62 1,94 3,06
	5^{15} bis 5^{30}				12 mm von Mitte Stift bis Platte					3,72 1,99 3,14
16a	3. X. 4^{00} bis 5^{18} (Beginn 12^{30})	6%ig	150|120|0,8	18000 qmm	125 mm bis 135 mm	$16,8^0$ bis $17,1^0$	55	50		2,51 1,25 2,18
	5^{47} bis 6^{15}	Al Kühlschlange Pb				$17,3^0$ bis $16,9^0$		60		2,51 1,22 2,2
	6^{25} bis 7^{25}					$16,9^0$ bis 17^0		75		2,52 1,20 2,22
	7^{35} bis 7^{50}					17^0		100		2,52 1,20 2,22
	8^{10}							50		2,52 1,23

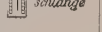
Generator					Zelle				Konsum				$a=\frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$ $\eta_z=\frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t=\frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g}$	Bemerkungen
$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\varphi$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\varphi$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm		
54,3	115,7	10°45	31,6	2,53	34,5	42,9	28°30	139	30,5	76	9°45		52,3	
0,5	0,66	0,187	0,38	1,29	—13,7	—17,7	0,477	—10,6	15,9	21	0,169	12,05	29,2	
54,3	115	0,982	25,6	2,18	31,7	60,6	0,879	16,6	26	55	0,985	12,2	18,2	
													57,3	
													53,4	
54,2	116,5	15°	44,8	2,56	34,7	42,08	29°30	145	31,1	78,9			52,2	
0,5	0,68	0,259	0,37	1,31	—14,1	—18,5	0,492	—10,8	16,1	21,8		11,9	30,5	
54,2	115,8	0,966	25,4	2,2	31,7	60,6	0,87	16,6					18,7	
''' 79,1	257,5	18°15	57	4,00	50,4	76	32°15	169	45	184,7	0°		55,3	
0,85	1,9	0,313	0,38	2,19	—23,2	—50,8	0,534	—10,6	25,1	56	0	11,3	40,1	
79,1	255,6	0,95	24,6	3,35	44,8	126,8	0,845	15,8	37,4	128,7	1,01	11	21,8	
108,6	419,2	16°15	43,8	4,77	68,05	116,7	28°15	134	62,5	309,1	0°		55,9	
1,0	2,7	0,28	0,37	2,67	—33,65	—89,8	0,473	—12,6	35,8	96,8	0	13,3	43,5	
108,6	416,5	0,96	28,3	3,96	59,3	206,5	0,881	17	51,2	212,8	1,04	12,8	23	
''' 108,2	379,5	19°	47	4,49	71,9	113	28°45	116,6	58,5	273,5	0		58,5	
1,0	2,7	0,326	0,378	2,63	—33,1	—87	0,481	—12,6	35,1	93	0	13,2	43,5	
108,2	376,8	0,945	31,2	3,64	63,9	200	0,877	20	46,7	180,5	1,05	12,7	24,5	
''' 53,7	89	15°45	36,6	2,0	35,1	35	26°30	98,5	27,9	56,1	8°		54,2	
0,55	0,6	0,271	0,5	1,07	—13,2	—14,1	0,446	—12,3	15,2	16,7	0,139	13,8	28,7	
53,7	88,4	0,962	32,6	1,69	32,5	49,1	0,895	21,5	23,4	39,4	0,99	13,8	18,8	
'''' 54	97,9	14°	35,4	2,12	33,1	37,7	23°37	104	29,7	63,9	0°		51	
0,5	0,55	0,242	0,46	1,05	—13,1	—13,8	0,401	—12,5	15,3	16,8	0	13,9	26,8	
54	97,3	0,97	30	1,85	30,4	51,5	0,916	17,9	25,4	47,1	1	13,7	17,2	
''' 54,1	91,1	16°15	38,2	2,07	35,4	34	33°30	120,6	29,5	59,2			55,1	Nach $6\frac{1}{2}$stündigem ununterbrochenen Betrieb
0,5	0,58	0,28	0,435	1,11	—14	—15,5	0,552	—12,6	16	18,4		13,9	31,4	
54,1	90,5	0,96	32,4	1,75	34	49,5	0,833	23,4					20,2	
108,4	385	19°	47,6	4,61	72,4	109	32°30	133,3	60,5	285,2	0		59,5	
1,1	3,04	0,326	0,4	2,7	—34,1	—92	0,537	—12,6	36,1	99,5	0	13,1	45,8	
108,4	382	0,945	30,8	3,74	63,8	201	0,843	20,25	48,5	185,7	1,03	13	25,85	
'' 108,4	412	19°30	52,3	4,85	69,8	109,5	31°	145	64	315	0		57,2	
1	2,78	0,334	0,36	2,76	—35	—96,5	0,515	—12,7	37	103	0	13,3	46,9	
108,4	409,2	0,943	28,8	3,99	60,3	206	0,857	17,7	52,3	212	1,01	13,1	25	
78,5	231	17°15	49,1	3,58	48,2	61	36°22	180	47	170,1	0		53,6	
0,8	1,55	0,297	0,41	1,93	—24,1	—46,5	0,593	—12,5	26,1	50,6	0	13,3	43,3	
78,5	229,4	0,955	26,9	3,01	41,8	107,5	0,805	17,3	39,1	119,5	1	12,8	21,9	
'''' 78,6	240,5	15°	43,9	3,68	47,4	60	30°30	164,6	48,5	182,5	0		53,5	
1,0	2,0	0,259	0,50	1,98	—24,4	—48,3	0,508	—12,3	26,4	52,5	0	13,3	44,6	
78,6	238,5	0,965	26	3,1	40,6	108,3	0,862	15,2	40,6	130	1,02	13	21,8	
53,9	117,4	5°30	24,8	2,47	33,2	44,2	23°45	178,2	29,8	74,2	8°45		49,8	Zuvor 1 Stde. Gl.Str.Form. 223 Volt|0,1 Amp
0,4	0,5	0,096	0,32	1,21	—12,4	—16,6	0,403	—10,25	15,1	18,9	0,152	12,1	27,4	
53,9	116,9	0,995	24,8	2,15	30,95	60,8	0,915	15,7	25,7	55,3	0,988	11,9	16,1	
'''' 53,8	118,4	0°	0	2,49	32,8	45,2	26°30	168	29,9	74			48,7	
0,2	0,24	0	0,164	1,2	—12,1	—14,5	0,446	—10,1	14,7	17,9		12,1	24,3	
53,8	118,2	1	24,5	2,18	30,6	59,7	0,895	15,7					15,1	
''' 54,3	120,7	0°	0	2,49	32,6	46,1	24°45	130,8	30	74,6	9°45		47,6	
0,3	0,36	0	0,25	1,17	—12,1	—14,15	0,419	—10,3	14,2	17	0,169	11,8	23,5	
54,3	120,3	1	24,5	2,2	30,2	60,2	0,908	15,1	26,4	57,6	0,985	12,1	14,1	
'''' 54	120,9	0°	0	2,49	32,4	46,9	23°	91,6	30,1	75	9°30		47,6	
0,3	0,36	0	0,25	1,16	—12,1	—14	0,391	—10,4	14,1	16,9	0,165	11,7	23,0	
54	120,5	1	24,4	2,21	30	60,9	0,92	14,8	26,6	58,1	0,986	12,2	14	
													49	

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen								$\frac{\tilde{E}}{\tilde{J}}$ Am $\frac{J}{\tilde{J}}$
		Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\tilde{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	
16 b	5. X. 9^{45} bis 10^{10}	$NaHCO_3$ 6 %ig	150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 135 mm		55	50	12,802	2,5
										1,25
	11^{00} bis 11^{20}	Al Kühl-Pb schlange	150|27,5|0,8 tief	4125 qmm						2,16
										2,28
										1,24
	2^{00} bis 2^{13}							50		1,92
										2,27
										1,25
	2^{36} bis 2^{45}							75		1,89
										2,27
										1,21
	2^{55} bis 3^{10}							100		1,92
										2,28
										1,19
	3^{15} bis 3^{20}							50		1,94
										2,27
	3^{55} bis 4^{00}		150|120|0,8	18000 qmm	30 mm	15,9 %	55			1,24
										2,79
										1,4
	4^{26} bis 4^{33}							100		2,42
										2,82
										1,35
	5^{10} bis 5^{36}		150|27,5|0,8	4125 qmm	27,5 mm			50		2,48
										2,65
										1,4
	5^{57} bis 6^{10}							100		2,24
										2,65
										1,35
	6^{15} bis 6^{20}		150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 135 mm			50		2,28
										2,49
										1,25
16 c	6. X. 9^{50} bis 10^{00}	6 %	150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 125 mm	17,9 bis 17,2 %	55	50		2,5
										1,25
	10^{20} bis 10^{29}					17,1 bis 17 %		100		2,16
										2,52
										1,2
	10^{30} bis 10^{45}							75		2,22
										2,52
										1,21
	11^{15} bis $11^{22}\,1/2$					17,2 bis 17,1 %		40		2,21
										2,51
										1,25
	11^{30} bis 11^{55}					16,9 bis 17 %	40	50		2,18
										1,76
										0,85
	12^{00} bis 12^{30}					16,8 bis 17 %		75		1,54
										1,74
										0,84
	12^{32} bis 12^{58}					17 %		100		1,53
										1,79
										0,81
	3^{20} bis 3^{50}					19,2 bis 19,8 %	70	50		1,59
										3,28
										1,65
	3^{55} bis 4^{20}					19,6 bis 20 %		75		2,84
										3,46
										1,72
	4^{22} bis 4^{50}					20 %		100		3,01
										3,47
										1,7
	4^{55} bis 5^{13}					20 %		50		3,02
										3,44
										1,76
	5^{15}									2,95
										3,32
										1,67

Generator					Zelle					Konsum				$\alpha = \frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$	Bemerkungen
$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin \tilde{\varphi}$ $\cos \varphi$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\hat{\varphi}$ $\sin \hat{\varphi}$ $\cos \varphi$	$\hat{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\hat{R}$ Ohm	$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\hat{\varphi}$ $\sin \hat{\varphi}$ $\cos \varphi$	$\overline{R}$ Ohm $\hat{R}$ Ohm	$\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\hat{W}_g}$	
54	115	$10^0\,30'$	46,4	2,46	33,4	44	$27^0\,30'$	202	29,5	72			50	8^{45}	Beginn
0,3	0,37	0,182	0,24	1,21	—12,3	—14,9	0,462	—10,2	14,9	18,6		11,9	25,3		
54	114,6	0,983	25,4	2,135	31,1	58,9	0,887	16,4					16,2		
54	99,8	$16^0\,45'$	65,2	2,25	36,4	42	$26^0\,45'$	159	27,1	59,9			54,4		
0,35	0,43	0,288	0,27	1,21	—12,7	—15,4	0,45	—10,5	14,6	18,1		11,8	26,9		
54	99,4	0,958	29,4	1,89	34,1	57,4	0,892	20,2					18,1		
54,1	98,8	$15^0\,45'$	60,2	2,24	36,8	41,5	$27^0\,45'$	163	27,5	59,9			55		
0,4	0,5	0,272	0,32	1,21	—13	—15,7	0,466	—10,7	14,9	18,6		11,9	27,1		
54,1	98,3	0,962	29,8	1,88	34,4	57,2	0,885	20,7					18,9		
53,8	101,2	$12^0\,30'$	32,7	2,24	36,3	43	$26^0\,15'$	104	27,5	60,4			53,3		
0,35	0,42	0,216	0,29	1,19	—12,6	—15	0,442	—10,6	14,3	17,3		11,8	25,9		
53,8	100,8	0,976	28,8	1,89	34,2	58	0,897	19,8					17,1		
54,1	102,3	14^0	27,6	2,26	36	44	$30^0\,45'$	93,1	27,5	60,1			52,2		
0,35	0,42	0,242	0,294	1,16	—12,2	14,2	0,511	—10,5	14,1	16,8		11,85	24,4		
54,1	101,9	0,97	28,8	1,94	33,9	58,2	0,86	20,3					16,4		
													54,6		
54,1	129,2	$10^0\,30'$	52	2,76	32,6	41,4	$27^0\,45'$	242	33,1	92,75	0^0		50,3		
0,4	0,56	0,182	0,286	1,39	14,4	—20	0,466	—10,4	17	23,8	0	12,1	32,6		
54,1	128,6	0,983	22,8	2,38	29,2	61,4	0,884	13,9	28,4	69,0	1	11,7	18,4		
54	133,8	$4^0\,15'$	10,8	2,78	32	43,85	$26^0\,15'$	119,5	33,7	94,6	$6^0\,15'$		47,9		
0,4	0,54	0,074	0,296	1,34	—14,1	—18,9	0,442	—10,5	16,2	21,8	0,109	12	30,2		
54	133,3	0,997	21,9	2,44	28,7	62,7	0,896	13,1	29,6	72,8	0,994	12	16,3		
53,8	120,4	$5^0\,30'$	25,4	2,62	34,1	40,5	$27^0\,45'$	215	32	84,5	0^0		52,9		
0,35	0,49	0,096	0,25	1,38	—14,6	20,2	0,466	—10,6	17	23,8	0	12,1	33,2		
53,8	119,9	0,995	24,2	2,23	30,8	60,7	0,885	15,6	27,1	60,7	1	12,1	19,8		
53,8	123,5	0^0	0	2,62	33,0	42,8	$25^0\,30'$	103	32	85,3	0^0		51		
0,5	0,68	0	0,37	1,34	—13,6	—18,2	0,431	—10,2	16,3	22	0	12,1	29,8		
53,8	122,8	1	23,6	2,25	30,1	61	0,902	14,8	27,5	63,3	1,01	12,1	17,8		
													50,3		Kontrolle
54,5	115	$13^0\,15'$	57,6	2,42	33,5	44	$29^0\,30'$	220	29,5	71,8			50		
0,45	0,56	0,229	0,36	1,21	—12,4	—15	0,492	—10,2	15	18,7		12	25,4		
54,5	114,4	0,973	26,0	2,18	31,1	59	0,871	16,4					16,3		
54,5	119,5	$9^0\,30'$	21,4	2,5	32,7	46	26^0	101	30	73,9			47,6		
0,37	0,44	0,165	0,31	1,18	—12,1	—14,3	0,438	—10,3	14,2	17		11,8	23,8		
54,5	119,1	0,986	24,9	2,21	30,4	60,3	0,899	15,3					14,2		
54,2	118,8	8^0	24	2,49	32,9	45,2	$32^0\,15'$	154	29,9	73,7			48		
0,35	0,42	0,139	0,39	1,19	—12,1	—14,4	0,534	—10,2	14,3	17,3		11,8	24,2		
54,2	118,4	0,99	24,8	2,19	32,2	59,6	0,846	17,4					14,6		
54,2	114,8	$14^0\,15'$	78,8	2,47	33,5	43,9	$26^0\,30'$	246	29,7	72,4			49,9		
0,4	0,5	0,246	0,32	1,23	—12,6	15,5	0,446	—10,2	15,1	18,9		12,1	26,2		
54,2	114,3	0,969	25,7	2,14	31	59,4	0,895	162					16,5		
40	58,3	$19^0\,15'$	81	1,72	24,9	23,8	$26^0\,30'$	183	20,6	35,3			48,3		
0,3	0,25	0,33	0,35	0,84	—8,9	7,5	0,446	—10,6	10,3	8,8		12,1	24		
40	58	0,944	27,6	1,50	23,3	31,3	0,895	17,4					15,1		
40	60	$12^0\,15'$	34,4	1,73	24,3	24,6	$26^0\,30'$	128	20,7	36	$5^0\,30'$		48,3		
0,2	0,17	0,212	0,24	0,8	—8,5	—6,8	0,446	—10,6	10,1	8,5	0,096	12,0	21,6		
40	59,8	0,977	26,8	1,54	22,8	31,4	0,895	16,5	18,1	27,5	0,995	11,9	14,2		
39,9	61,1	$16^0\,15'$	35,5	1,72	23,9	25	$23^0\,15'$	85,9	21	34,9			45,3		
0,2	0,16	0,28	0,25	0,79	—8,2	—6,5	0,395	—10,4	10	8,1		12,4	20,6		
39,9	60,9	0,96	26,2	1,53	22,4	31,5	0,918	16,0					13,3		
69	190	$14^0\,45'$	66,8	3,25	43,2	70,7	$26^0\,45'$	211,5	39	127,4	$4^0\,15'$		50,3		
0,42	0,69	0,255	0,26	1,63	—17,1	—27,9	0,45	—10,5	19,9	32,8	0,074	12,1	28,3		
69	189,3	0,967	25,2	2,82	39,6	98,6	0,893	15,7	33,6	94,6	0,997	11,9	17,3		
68,6	204,6	$9^0\,45'$	31,4	3,44	42	69,3	$27^0\,22'$	154,5	38,6	131,8			49,7		Aenderung von
0,54	0,93	0,169	0,31	1,7	—18,1	30,8	0,46	—10,6	19,2	33		11,2	30,8		Meßbereich und
68,6	203,7	0,985	23,2	2,99	37,8	10,1	0,888	14,3					16,1		Widerstand
69	205,1	$10^0\,15'$	27,2	3,44	41,6	70	27^0	115	38,9	133,8	$5^0\,30'$		49,1		
0,62	1,05	0,195	0,36	1,69	—18	30,4	0,454	—10,6	19,2	32,6	0,096	11,3	30,3		
69	204	0,98	23,3	3,0	37,6	100,4	0,891	14,1	33,9	101,2	0,995	11,3	15,9		
68,0	200	$10^0\,45'$	51,2	3,42	42,5	66	32^0	262	38,5	130,2			51,2		
0,55	0,97	0,187	0,31	1,69	—18,3	—30,9	0,53	—10,8	20	35,2		11,4	31,9		
68,6	199	0,982	23,7	2,98	38,4	96,9	0,848	15,2					17,6		
													50,5		Mit dem früheren Meßbereich

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen								$\tilde{J}$ An…
		Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\tilde{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	$\frac{\tilde{J}}{J}$
16 d	7. X. 12^{15} bis 12^{22}	$NaHCO_3$ 6 %ig	150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 125 mm	17,9 bis 21 1/2 °	80	50		3,84 1,99
	12^{25} bis 12^{52}	Al Kühl-schlange Pb						75		3,29 3,87 1,96
	12^{57} bis 1^{12}					22,2 bis 22,7 °		100		3,34 3,92 1,95
	4^{15}						95	50		3,4 4,55 2,33
	4^{45} bis 4^{50}					22 bis 24 °				4,58 2,38
16 e	8. X. 9^{00} bis 9^{07}	6 %	150|120|0,8	18000 qmm	130 bis 125 mm	23 bis 23 1/2 °	95	50		4,55 2,35
	9^{12} bis 9^{20}					23 1/2 bis 24 1/2 °		100		3,9 4,67 2,34
	9^{30} bis 9^{55}					27 bis 28 °	110	50		4,04 5,35 2,79
	10^{00} bis 10^{26}					28 bis 29 °		66		4,55 5,4 2,76
	10^{40} bis 11^{10}					25 bis 28,3 °		100		4,64 5,53 2,79
	11^{15}							75		4,76 5,54 2,82
	11^{20}							66		5,52 2,82
	12^{35} bis 12^{42}					17,4 °	55	50		2,41 1,15 2,12
17	14. X. 9^{45} bis 10^{02}		80|105|0,25	8400 qmm	130 mm		55	50		2,28 1,31
	10^{05} bis 10^{42}							75		1,87 2,28 1,3
	10^{45} bis 11^{05}							100		1,87 2,29 1,3
	11^{20} bis 11^{52}						80			1,88 3,64 2,07
	12^{25} bis 12^{45}							75		3,0 3,64 2,1
	12^{50} bis 1^{20}							50		2,98 3,62 2,12
18 a	15. X. 10^{25} bis 10^{35}	Al Pb Kühl-schlange	62 1/2|130|0,1	8130 qmm	10 mm		55	50		2,94 2,21 1,31
	10^{37} bis 11^{05}							75		1,78 2,21 1,30
	11^{08} bis 11^{21}							100		1,78 2,23 1,3
	11^{25} bis 11^{44}						80			1,81 3,5 2,04
										2,84

Generator				Zelle					Konsum				$a = \frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$	Bemerkungen
$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\tilde{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\tilde{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\tilde{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g}$	
78,8	254,8	11° 45	54,2	3,82	49,5	88,2	29° 30	228	43	165	0°		51,9	
0,5	1	0,204	0,25	1,96	—20,6	—40,4	0,492	—10,5	22,2	44,1	0	11,2	31,4	
78,8	253,8	0,979	24,5	3,28	45	128,6	0,871	15,8	36,8	121,1	1	11,2	17,3	
78,7	260	9° 45	30,4	3,83	48,5	90	27°	144	43,5	168,5	0°		50,7	
0,6	1,2	0,169	0,31	1,94	—20,3	—39,4	0,454	—10,5	22	43,1	0	11,2	30,4	
78,7	258,8	0,985	24	3,3	44	129,4	0,891	15	37,6	125,4	1	11,3	16,6	
78,6	262	12° 45	30,4	3,85	48	90,2	27° 22	112	43,6	170	3° 30		49,8	
0,8	1,56	0,221	0,41	1,92	—20,2	—38,8	0,46	—10,5	21,8	42,5	0,061	11,2	30,1	
78,6	260,4	0,975	23,8	3,34	43,5	129	0,888	14,7	37,8	127,5	0,998	11,1	16,2	
													51,2	
													52	
93,3	347,5	19°	86,9	4,52	59,1	120	28° 45	223	50,5	229,7	0°		51,7	
1,7	4	0,326	0,725	2,34	—25,7	—60,1	0,481	—11	26,6	62,5	0	11,3	33,4	
93,3	343,5	0,945	26,4	3,87	53,2	180,1	0,876	15,7	43	167,2	1	11	18	
93,3	366,2	15°	35,6	4,64	56,7	126,7	25° 15	107	52	244,7	0°		50,1	
1,1	2,6	0,259	0,47	2,31	—25	—57,7	0,427	—10,8	26,1	61	0	11,2	31,6	
93,3	363,6	0,965	24	4,02	50,9	184,4	0,905	14	45	183,7	1,01	11,2	16,7	
108	473	17° 45	81,2	5,32	67,9	160	25° 45	208,6	58,7	320,5	0°		52,2	
2,1	5,8	0,305	0,75	2,78	—31,1	—86,5	0,434	—11,2	31,4	87,5	0	11,3	35,1	
108	467,2	0,952	25	4,55	60,3	246,5	0,9	14,8	49,7	233	1,03	10,9	18,5	
108,2	480	19° 15	68	5,37	67,1	165,2	23° 45	151	59,8	325,8	0°		51,2	
2,1	5,8	0,33	0,76	2,78	—30,7	—85,3	0,403	—11,05	31,1	85,8	0	11,3	34	
108,2	474,2	0,944	24,8	4,6	59,5	250,5	0,916	14,1	51	240	1,02	11,0	17,9	
108,2	505,2	13° 15	32	5,47	64,7	170,1	20° 30	91,5	60,3	344	0°		50,5	
1,0	2,8	0,229	0,36	2,77	—30	—83	0,35	—10,8	31,2	87,0	0	11,2	32,8	
108,2	502,4	0,973	23,4	4,71	57,4	253,1	0,937	13	51,7	257	1,04	10,8	17,2	
													51	
													51,1	
54,2	114,6	5° 30	23,9	2,39	33	46,7	25° 15	186	28,7	68,3	5° 30		47,8	
0,4	0,46	0,096	0,35	1,10	—11,4	—12,5	0,427	—10,4	13,9	16	0,096	12,1	21,2	
54,2	114,1	0,995	25,7	2,12	30,95	59,2	0,904	16,15	25	52,3	0,995	11,9	14	
53,9	94	22° 30	84,9	2,25	37,5	37	30° 30	170,4	27,1	60			57,5	
0,9	1,2	0,383	0,69	1,3	—13,7	—17,8	0,508	—10,5	15,7	20,6		12	32,5	
53,9	92,8	0,923	31,2	1,83	34,8	54,8	0,861	22,1					21,94	
54	96	19°	48	2,27	37,0	38,1	31° 7	119	27,5	61			57	
0,5	0,65	0,326	0,385	1,28	—13,4	—17,1	0,517	—10,5	15,3	19,9		11,8	31	
54	95,4	0,945	30,6	1,87	34,5	55,2	0,856	21,6					20,8	
53,9	98	15°	28,8	2,28	36,8	39	31° 7	91,1	27,5	62			56,8	
0,4	0,52	0,259	0,31	1,26	—13,3	—16,8	0,517	—10,5	15,3	19,9		11,8	30,1	
53,9	97,5	0,965	29,7	1,9	34,3	55,8	0,856	21,1					20,3	
78,4	225	18° 15	38,1	3,63	52,5	75,6	32° 15	107	40,2	147,4	0°		56,9	
0,9	1,9	0,313	0,435	2,05	—22,1	—45,3	0,534	—10,8	23,4	48,5	0	11,3	37,6	
78,4	223,1	0,95	27,5	3,0	47,55	120,9	0,846	18,7	32,7	98,9	1,0	10,9	21,6	
78,3	223,5	17° 30	48,5	3,62	52,7	75	31° 7	136	40,1	148,5	0°		57,8	
0,7	1,5	0,301	0,33	2,08	—22,1	—46	0,517	—10,6	23,9	50,2	0	11,4	38,0	
78,3	222	0,953	27,6	2,96	47,8	121	0,856	18,9	32,2	98,3	1,03	10,8	22,5	
78	220,2	17° 15	71,3	3,61	53,1	73,2	32° 22	211	39,6	145,7	0°		58,6	
0,7	1,5	0,297	0,33	2,09	—22,8	—46,5	0,55	—10,7	24	50,9	0	11,3	38,9	
78	218,7	0,955	27,8	2,94	48,8	119,7	0,835	19,9	31,5	94,8	1,02	10,7	23,1	
54	88,1	24°	85,5	2,18	36,8	26	35° 45	196	30,6	66			59,3	
0,4	0,52	0,407	0,305	1,3	—16,1	—20,9	0,584	—12,4	18,2	23,8		13,9	44,6	
54	87,6	0,913	33,2	1,75	33,1	46,9	0,81	23,4					27	
54,2	90	22° 15	52,8	2,18	36,5	27,0	35°	131,4	30,9	66,9	9° 45		58,9	
0,6	0,78	0,379	0,46	1,28	—16	—20,5	0,574	—12,5	18,1	23,5	0,169	13,9	43	
54,2	89,2	0,925	33	1,77	32,8	47,5	0,819	22,6	25	43,4	0,985	14,3	26,15	
54	91,8	19°	41,6	2,19	36,0	28,02	34° 37	99,8	31,0	67,1			58,4	
0,3	0,39	0,326	0,23	1,26	—15,6	—19,65	0,568	—12,4	18	23,4		13,85	41,2	
54	91,4	0,945	31,6	1,79	32,4	47,7	0,823	22					25,5	
78,3	210	20° 45	40,75	3,46	52	53,5	34° 45	111,6	45,2	158,5	0°		58,4	
0,9	0,8	0,354	0,24	2,03	—25,2	—51,1	0,57	—12,4	27,1	55,3	0	13,3	48,9	
78,5	208,2	0,935	29,6	2,8	45,5	104,6	0,822	19,8	36,2	103,2	1,0	12,75	26,35	

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen								$\hat{J}$ A
		Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	
18a Forts. von vor. Seite	11^{55} bis 12^{01}									3, 2,
	12^{23} bis 12^{50}						55	50		2,
	1^{05} bis 2^{45}									1, 2,
	3^{23} bis 3^{45}				110 mm					1, 2,
	3^{50} bis 4^{03}				55 mm					1, 2,
	4^{13} bis 4^{27}				10 mm					1, 2,
	5^{00} bis 5^{10}							100		1, 2,
	5^{17} bis 5^{41}				110 mm					1, 2,
	5^{45} bis 6^{00}				55 mm					1, 2,
	6^{20} bis 6^{25}		$62\frac{1}{2}\vert 40\vert 0{,}1$	2500 qmm						1, 2,
	6^{29} bis 6^{42}							50		1, 2,
18b	16. X. 9^{05} bis 9^{20}						55			1,
	9^{30} bis 9^{50}							75		1, 2,
	9^{55} bis 10^{00}						110			1, 4,
	10^{20} bis 10^{30}						55			2, 3, 1,
	11^{15} bis 11^{30}									1, 1, 1,
19	1. XI. 5^{40} bis 5^{55}	6% $NaHCO_3$ pur. 	99,5% Al 150|120|1	18 000 qmm	15 mm		55	50	12,802	2, 1,
	6^{15}							65		2, 1,
	6^{40} bis 6^{45}						80			2, 3,
	6^{55} bis 7^{00}						110			2, 5,
			150|25|1	3750 qmm			55			3, 4, 2, 1,
							110			2, 5,
										2, 4,

Generator				Zelle					Konsum				$a=\frac{\overline{J}}{\hat{J}}$	Bemerkungen
$\hat{E}$ Volt $\overline{E}$ $\check{E}$	$\hat{W}$ Watt $\overline{W}$ $\check{W}$	$\check{\varphi}$ $\sin\check{\varphi}$ $\cos\check{\varphi}$	$\hat{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\check{R}$ Ohm	$\check{J}$ Amp $\overline{J}$ $\hat{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\check{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\hat{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\check{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\check{W}$	$\tilde{\varphi}$ $\sin\tilde{\varphi}$ $\cos\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\check{R}$ Ohm	$\eta_z=\frac{\overline{W}_z}{\check{W}_z}$ $\eta_t=\frac{\overline{W}_c}{\check{W}_g}$	
78,5	205,5	22 0	47,5	3,44	52,3	49,5	37 0 45	117	44,8	155,2	0 0		58,8	
0,85	1,7	0,375	0,42	2,03	—25,2	—51,1	0,612	—12,4	27,1	55,25	0	13,3	50,9	
78,5	203,8	0,927	30,2	2,77	46	100,6	0,79	20,8	35,6	100,1	1,0	12,7	26,9	
													59,8	
													60,4	
54,3	83,2	22 0 45	74,9	2,05	37,8	27,5	36 0 30	181	29,3	58,5			60,45	
0,45	0,56	0,387	0,36	1,21	—15,1	—18,3	0,595	—12,5	17,2	21,5		13,8	40	
54,3	82,6	0,922	35,7	1,65	34,6	45,8	0,803	26,1					25,8	
54,3	87	24 0 15	84,4	2,17	37,4	26	37 0 45	202	30,4	64,2			59,7	
0,4	0,52	0,411	0,31	1,28	—16,1	—20,6	0,612	—12,6	18,2	23,6		14	44,1	
54,3	86,5	0,912	34	1,75	33,8	46,6	0,79	24,5					27,2	
54,3	91,2	24 0 15	88,3	2,28	37	23,99	38 0 50	224	32	72			60,3	
0,5	0,69	0,411	0,36	1,35	—17	—22,95	0,628	—12,6	19,2	26,5		13,9	49	
54,3	90,5	0,912	32,6	1,84	32,8	46,9	0,778	22,9					29,05	
54,2	96	19 0	35,6	2,29	35,8	26,3	36 0 30	111,1	32,3	74	2 0 30		58,7	
0,6	0,81	0,326	0,44	1,32	—16,3	—21,5	0,595	—12,3	19	25,7	0,044	14,1	45	
54,2	95,2	0,945	30,8	1,87	31,8	47,8	0,804	21,2	26,1	48,3	0,99	14,1	26,8	
54,2	87	22 0 15	38,3	2,1	36,8	28,6	36 0 30	96	30	61,15			58,7	
0,5	0,62	0,379	0,4	1,21	—15,1	—18,3	0,595	—12,5	17,2	21,5		13,8	39	
54,2	86,4	0,926	34	1,72	33,9	46,9	0,804	24,6					24,7	
54,3	92	22 0 15	40,4	2,18	36,2	27,9	33 0 7	94,8	31,1	67,9	9 0 45		58,2	
0,5	0,63	0,379	0,397	1,27	—15,9	—20,2	0,546	—12,5	18,1	22,8	0,169	14,4	42	
54,3	91,4	0,925	32,3	1,77	32,5	48,1	0,837	22	25,3	45,1	0,985	14,1	24,8	
54,3	83	23 0 15	38,4	2,03	37,1	29,2	35 0	88,1	28,5	56			58,6	
0,35	0,42	0,395	0,292	1,17	—14,5	—17	0,574	—12,4	16,6	19,9		13,8	36,8	
54,3	82,6	0,918	35,6	1,65	34,2	46,2	0,82	25,3					24	
54	80,2	24 0 52	80,9	2,0	37,9	28	36 0 5	172,5	28,4	54,6			59,7	
0,35	0,42	0,421	0,29	1,19	—14,7	—17,5	0,589	—12,4	17	20,6		14,05	38,4	
54	79,8	0,907	36,6	1,61	35	45,5	0,808	27					26,9	
													60,2	
54,3	81,1	23 0 37	50,8	2,0	37,8	29,0	36 0 15	116	28,5	54,9			59,4	
0,5	0,6	0,401	0,416	1,17	—14,3	—16,7	0,591	—12,2	16,5	19,8		13,8	36,6	
54,3	80,5	0,916	36,6	1,62	35	45,7	0,806	26,8					24,4	
109	341,5	24 0 15	54,8	4,23	75,6	110	35 0	120,6	56,5	240	3 0 30		59,9	Lebhaftes Funken an der Oberfläche
0,9	2,3	0,411	0,354	2,52	—32	—80,6	0,574	—12,7	33,5	85,4	0,061	13,1	42,4	
109	339,2	0,91	35,1	3,4	68,5	190,6	0,819	24,7	45,5	154,6	0,998	13,3	25	
54,3	75	19 0 30	38,1	1,83	38,5	29	35 0 45	100,6	26	46,9			59,7	
0,53	0,39	0,334	0,32	1,1	—13,5	—13,7	0,584	—12,3	15,4	17,1		13,9	32,1	
54,3	74,6	0,942	39,5	1,46	36	42,7	0,812	30,4					22,8	
54,2	76,2	23 0 45	48,3	1,9	38,2	29	34 0 22	103	26,9	49,2			59,7	Al erholt sich
0,35	0,4	0,403	0,31	1,13	—14,1	—15,9	0,565	—12,5	16	18,2		14	35,5	
54,2	75,8	0,915	38,8	1,53	35,6	44,9	0,825	28,2					24	
52,3	109,3	6 0 45	30,2			28,4			31,9	80,9			55,8	
0,2	0,28	0,118	0,142		—18,8	—26,5		—13,3	17,4	26,8		12,3	48,3	
52,3	109	0,993	25,1			54,9							24,5	
52,3	108	6 0 45	23			28,1			31,9	79,9			55,8	
0,1	0,1	0,118	0,07		—18,7	—26,2		—13,3	17,2	26,3		12,3	48,3	
52,3	107,9	0,993	25,4			54,3							24,4	
76,5	228,7	0 0	0		52,9	52,5	29 0	159	47,4	176,2			59,5	
1	2,2	0	0,46		—28,7	—62	0,485	—13,1	27,1	62,8		12,4	54,2	
76,5	226,5	1	25,85		44,4	114,5	0,874	17,2					27,4	
105,2	437,5	14 0 15	48,6		74,3	84	37 0 20	205	66,3	353,5	0 0		58,5	
1	3,1	0,246	0,327		—41,4	—120	0,606	—13,5	38,6	118	0	12,6	58,9	
105,2	434,4	0,969	25,6		61,5	204	0,795	18,2	54	235,5	1,03	12,7	27	
52,3	110								32,2	80,7			55,4	
0,5					—18,7				17,1	24			$\eta_t=21,8$	
52,3	104,3	13 0 15	43,8			28,9			31	75,4	6 0 45		55,8	
0,5	0,7	0,229	0,365		—18,1	—24		—13,3	17,1	23,4	0,118	12,5	45,4	
52,3	103,6	0,973	26,4			52,9			25,8	52	0,993	12,7	22,4	
105,2	411,2	19 0 30	63,8		75,8	89	40 0 5	202	63,5	322,2	0 0		58,5	
1	3,0	0,334	0,338		—40,1	—113	0,644	—13,5	37,7	111,5	0	12,7	56	
105,2	408,2	0,943	27,2		64,3	202	0,765	20,4	51,1	210,7	1	12,4	27,1	

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen								$\tilde{J}$ Am $\overline{J}$ $\tilde{J}$
		Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Alum.-Fläche (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast.-Widerstand	
20 b		6 % $NaHCO_3$ pur. Kohlschlange	Durchmesser 5 mm, 125 mm tief	1960 qmm	60 mm		206	100	ca. 8 Ohm	
20 c			Durchmesser 2 mm, 125 mm tief	790 qmm			260			
20 d			155|62 1/2|0,2 (Platte)	9700 qmm			153			

Versuch Nr.	Datum und Zeit	Charakteristische Versuchsbedingungen							
		Elektrolyt	Dimensionen der Al-Elektroden	Fläche der Elektroden (bei Platten einseitig)	Abstand der Elektroden	Temp. und Kühlung	Gen. Sp. $\hat{E}_g$ (approximat.)	Wechselzahl z	Belast. Widerstand
21 a	3. XI. 3^{20} 4^{35} 6^{47}	6 % $NaHCO_3$ pur.	140|110|1 Stehende Platten	15400 qmm	8 mm		110	50	11,754 Ohm
21 b	4. XI. 9^{35} bis 9^{50} 3^{10}								
22 a	5^{35} 8^{15}								
22 b	9^{15} 9^{55} 12^{30}								
23 a	4^{20} bis 5^{30} 7^{12} 7^{25} 7^{30}								7,3085
23 b	7^{40} bis 7^{55}							100	
24 a	6. XI. 6^{50} 7^{40} bis 8^{30} 9^{15}		Liegende Platten					50	11,754
24 b	7. XI. 6^{15} 6^{25}								

[1]) Die stationären Werte der Wirkungsgrade sind fett gedruckt.

Generator				Zelle					Konsum				$a = \frac{\overline{J}}{\tilde{J}}$ $\eta_z = \frac{\overline{W}_z}{\tilde{W}_z}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g}$	Bemerkungen
$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd. $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{J}$ Amp $\overline{J}$ $\hat{J}$	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ Mfd $\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm	$\tilde{E}$ Volt $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{W}$ Watt $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ Ohm $\tilde{R}$ Ohm		
				0,360 (0,018) 0,36	206 (—0,705) 206	39,78 (—0,013) 39,79	57° 35 0,844 0,536	4,69 (—38,8) 1069						An Stelle der Bleiplatte Aluminiumplatte 188|82 = 15 400 qmm (Kondensatorversuche)
				0,213 (0,014) 0,212	260 (—0,705) 260	24,66 (—0,0097) 24,67	63° 30 0,895 0,446	2,33 (—5,14) 2740						
				0,26 (0,005) 0,26	152,8 (—0,77) 152,8	13,36 (0,004) 13,36	70° 15 0,941 0,337	5,11 (154) 1744						

Generator					Konsum					Zelle 1				$a = \frac{\overline{J_c}}{\tilde{J}_c}$ $\eta_t = \frac{\overline{W}_c}{\tilde{W}_g}$	Bemerkungen
$\tilde{E}$ $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{J}$ $\overline{J}$ $\hat{J}$	$\tilde{W}$ $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ $\tilde{R}$	$\tilde{E}$ $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{J}$ $\overline{J}$ $\hat{J}$	$\tilde{W}$ $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\overline{R}$ $\tilde{R}$	$\tilde{E}$ $\overline{E}$ $\hat{E}$	$\tilde{W}$ $\overline{W}$ $\hat{W}$	$\tilde{\varphi}$ sin $\tilde{\varphi}$ cos $\tilde{\varphi}$	$\tilde{C}$ $\overline{R}$ $\tilde{R}$]		
105,2	11,1	1189	0°		80,1	6,78	540							86 %[1]	Anfang des Versuchs
0,1	0	0	0		69,7	5,83	406		11,97						
105,2	11,1	1189	1,01		39,5	3,46	134							34,2	
105,2	10,13	1072			71,5	5,94	435							86,5	Ungünstigster Wert
0	0	0			61,9	5,13	317		12,07						
105,2	10,13	1072			35,8	2,97	118							29,4	
105,2	10,37	1069			73,9	6,15	470							**86,5**	Endwert (noch nicht ganz formiert)
					64,5	5,31	343		12,1						
					36,1	3,08	127							**32,2**	
105,2	9,89	1055			72,6	6,1	442							86,5	Anfang des Kontrollversuchs
					63,0	5,27	332		11,96						
					36,4	3,07	110							31,4	
105,2	10,97	1175			87	7,23	645							**86,7**	Ende (zugleich stationärer Wert in 6stündigem Betrieb)
					75,7	6,27	475		12,07						
105,2					43,1	3,58	170							**40,5**	
52,6	4,56	245			38	3,03	113,8							84,5	Stationärer Wert
—1					33,2	2,56	85		12,97					34,8	
52,6	4,67	251			38,1	3,04	115							**84,3**	
—1					33,6	2,56	86		13,12					**34,2**	
52,6	4,69	252			38,3	3,11	117							85	Seit 9[10] in Betrieb. Aufnahme von 3 Punkten der Schwingung
—1					33,8	2,64	89,2		12,8					35,4	
52,6	4,71	245,5			38,4	3,08	116,6							85,5	
—1					33,6	2,63	88,4		12,78					36	
52,6	4,75	257			38,5	3,09	117,4							**85,5**	
					34,1	2,64	90		12,46					**35**	
52,6	7,25	383,6			36,3	4,75	174,8							88,5	[345] Beginn
—1					32,3	4,20	135,5		7,7					35,4	
52,6	7,25	387,5			36,7	4,8	170							87,5	
—1					33,3	4,2	140		7,93					36,1	
52,6	7,36	395			37,5	4,91	184							87,2	
					32,1	4,28	137,3		7,5					34,8	
52,6	7,35	392,5			37,1	4,91	181,6							**87,2**	
					33,1	4,28	141,8		7,73					**36,1**	
52,6	7,69	411			37	4,91	179,3							**86,1**	
					32,5	4,23	137,5		7,68					**33,4**	
105,2	11,81	1272,5			83,3	6,9	591							87,2	
	0,1				72,5	6,01	435		12,06					34,2	
105,2	12,44	1334,2			83,1	6,95	588							86,4	
	0,07				72,8	6,0	436,8							32,7	
105,2	12,47	1345			83	6,9	590,5							**86,8**	
	0,1				72,9	5,99	436		12,18					**32,4**	
105,2	12,52	1338,7			81,8	6,9	571,5			64,8				85,8	
	0,57				71,2	5,91	420		12,05	34,6				31,5	
105,2	12,42	1316			81,9	6,9	570,5			64				**85,3**	
	0,55				71,2	5,89	419		12,1	34,6				**31,8**	